

ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของสารโมโนเอทาโนลามีนสำหรับเหล็กกล้าในสารละลายกรด
โพรไฟโอนิก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFICIENCY OF MONOETHANOLAMINE CORROSION INHIBITOR FOR STEELS
IN PROPIONIC ACID SOLUTION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical and Materials Engineering
Department of Metallurgical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของสารโมโนเอทานอลามีนสำหรับเหล็กกล้าในสารละลายกรดโพรไฟโอนิก
โดย	น.ส.ปฐมพร ลักขณาศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยู่ธยา)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พงศ์ภัทร หล่อตระกูล)	

ปฐมพร ลักษณะาศรี : ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของสารโมโนเอทานอลามีน
สำหรับเหล็กกล้าในสารละลายกรดโพรไฟโพนิก. (

EFFICIENCY OF MONOETHANOLAMINE CORROSION INHIBITOR FOR STEELS IN
N PROPIONIC ACID SOLUTION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลการยับยั้งการกัดกร่อนของสารโมโนเอทานอลามีนสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายกรดโพรไฟโพนิก 5% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง และในสภาวะไอสารละลาย ที่ความเข้มข้นของสารละลายโมโนเอทานอลามีน 30-90% โดยน้ำหนัก และทดสอบในสารละลายกรดโพรไฟโพนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 30-60% โดยน้ำหนัก) และในสารละลายกรดโพรไฟโพนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 60-100% โดยน้ำหนัก) ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร การวัดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าทำโดยการชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณอัตราการกัดกร่อน ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่ถูกการกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) และวิเคราะห์ออกไซด์ของเหล็กกล้าที่ถูกการกัดกร่อนด้วย X-ray diffraction (XRD) พบว่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้นมีอัตราการกัดกร่อนมากที่สุด รองลงมา คือ สภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง และในสภาวะไอสารละลายมีอัตราการกัดกร่อนน้อยที่สุด สาเหตุที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงเกิดจาก Fe_3C อยู่บนพื้นผิวชิ้นงาน และบริเวณเฟสไรต์ถูกกัดกร่อนมากกว่าบริเวณเพอร์ไลต์ เมื่อเติมสารละลายโมโนเอทานอลามีนลงไปพบว่าอัตราการกัดกร่อนทั้ง 3 สภาวะมีค่าลดลง เนื่องจากมีชั้นออกไซด์ของ $FeO(OH)$, Fe_3O_4 และ Fe_2O_3 อยู่บนพื้นผิวชิ้นงาน แสดงว่าสารโมโนเอทานอลามีนสามารถยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายกรดโพรไฟโพนิก

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5971428921 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORD: monoethanolamine, propionic acid, carbon steel, corrosion

Patomporn Lakkanasri :
 EFFICIENCY OF MONOETHANOLAMINE CORROSION INHIBITOR FOR STEELS I
 N PROPIONIC ACID SOLUTION. Advisor: Prof. GOBBOON LOTHONGKUM,
 Dr.Ing.

This research studied the effect of monoethanolamine or MEA on corrosion of A283 carbon steels both in water and 5 vol.% propionic acid solution at boiling point temperature of solution. MEA concentrations ranging from 30 to 90 wt.% in water was used. The 5 vol.% propionic acid containing around 30-60 and 60-100 wt.% MEA additions (100:1 and 100:5) by volume in the test solution was studied. The carbon steel coupons were tested in a liquid phase, liquid and vapor phase and vapor phase. The weight losses of coupons were evaluated to calculate corrosion rate. A scanning electron microscope and X-ray diffraction were used to characterize the corrosion surface of coupons. The results showed that the corrosion rate order was in the liquid phase > in the liquid and vapor phase > in the vapor phase. MEA decreased the corrosion rate of A283 carbon steel both in water and 5 vol.% propionic acid solution containing around 30-60 and 60-100 wt.% MEA additions (100:1 and 100:5) by volume. MEA can be considered as corrosion inhibitor of carbon steel both in water and propionic acid solution. The formed layers of $\text{FeO}(\text{OH})$, Fe_2O_3 and Fe_3O_4 on the surface were detected to prevent a corrosion attack. The formed layer of Fe_3C was also found and discussed. The more severe corrosion was in ferrite.

Field of Study: Metallurgical and Materials Engineering Student's Signature

Academic Year: 2018 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบ
ขอบพระคุณที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ
ทางด้านคำปรึกษา แนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ที่ให้การ
สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบริษัทระยองวิศวกรรมและซ่อมบำรุง จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย
และอนุเคราะห์สารยับยั้งการกัดกร่อนที่มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน สำหรับงานวิจัยครั้งนี้และให้
คำแนะนำแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็น
ประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัทสหวิริยาสตีล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์เหล็กกล้าคาร์บอน
A283 และบริษัทโพสโค ไทยน็อคซ์ จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L สำหรับ
งานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือจน
งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่สนับสนุนในด้านต่างๆ
ด้วยดีตลอดจนสำเร็จการศึกษา และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจแก่
ผู้วิจัยด้วยดีเสมอ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

ปฐมพร ลักขณาศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม.....	4
2.1 การกัดกร่อนของโลหะ.....	4
2.2 รูปแบบการกัดกร่อนของโลหะ.....	5
2.2.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion).....	5
2.2.2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion).....	5
2.2.3 การกัดกร่อนในซอก (Crevice Corrosion).....	6
2.2.4 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion).....	6
2.2.5 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion Cracking).....	7
2.2.6 การกัดกร่อนที่ขอบเกรน (Intergranular Corrosion).....	7
2.2.7 การกัดกร่อนแบบสกัดเฉพาะที่ (Selective Leaching).....	7

2.2.8 การกัดกร่อนเนื่องจากการไหล (Erosion Corrosion).....	8
2.2.9 การเปราะของโลหะเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen Embrittlement).....	8
2.3 อัตราการกัดกร่อน	9
2.4 การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ	10
2.5 สารยับยั้งการกัดกร่อน.....	11
2.6 สารยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายกรดและน้ำมัน	13
2.7 ประเภทของสารยับยั้งการกัดกร่อน.....	16
2.7.1 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่สร้างชั้นฟิล์มพาสซีฟ (Passivation inhibitors).....	16
2.7.2 สารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์ (Organic inhibitors).....	16
2.7.3 สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบเกิดการตกตะกอน (Precipitation inhibitors).....	16
2.8 พื้นฐานกลไกการยับยั้งการกัดกร่อน.....	17
2.8.1 แบ่งตามหน้าที่ประเภทของสารยับยั้งการกัดกร่อน.....	17
2.8.1.1 สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบแคโทดิก	17
2.8.1.2 สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบแอโนดิก	17
2.8.1.3 สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบผสม	17
2.8.2 แบ่งตามรูปแบบการดูดซับ.....	17
2.8.2.1 การดูดซับทางกายภาพ.....	17
2.8.2.2 การดูดซับทางเคมี.....	18
2.9 การทดสอบแบบจุ่ม	18
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	30

3.1.3 องค์ประกอบของเหล็กกล้า	31
3.2 วิธีการทดลอง	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	34
4.1 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน	34
4.2 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B และ A.....	36
4.3 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B และ A.....	38
4.4 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ใน 20% สารละลายกรดโพรไฟโอนิก.....	42
4.5 ออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังจากทดสอบการกัดกร่อน	42
4.6 โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นหลังจากทดสอบการกัดกร่อน	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	47
บรรณานุกรม.....	48
ภาคผนวก.....	51
ภาคผนวก ก	52
ภาคผนวก ข	71
ภาคผนวก ค	92
ภาคผนวก ง.....	113
ภาคผนวก จ	115
ประวัติผู้เขียน.....	116

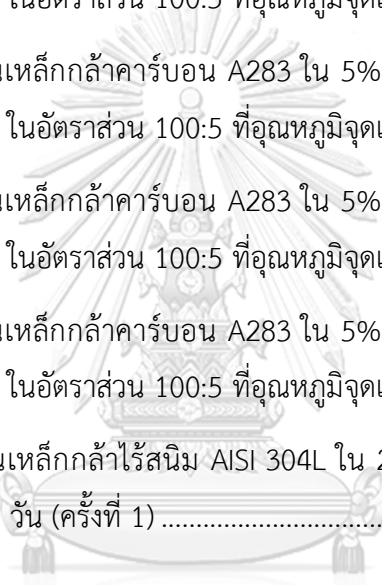
สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่า K ของการกัดกร่อนในแต่ละหน่วยของอัตราการกัดกร่อน	9
ตารางที่ 2.2 ความรุนแรงของการกัดกร่อนในแต่ละหน่วยของอัตราการกัดกร่อน	10
ตารางที่ 2.3 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในสภาพแวดล้อมต่างๆ	12
ตารางที่ 2.4 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	13
ตารางที่ 2.5 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในสารละลายกรดซัลฟิวริก	14
ตารางที่ 2.6 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในสารละลายกรดไนตริก	14
ตารางที่ 2.7 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก	14
ตารางที่ 2.8 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในสารละลายกรดฟอสฟอริก	15
ตารางที่ 2.9 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางในสารยับยั้งการกัดกร่อนโมโนเอทานอลามีน ที่มีการเติมและไม่มี การเติมคอปเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ซัลเฟต และทองสัมฤทธิ์ ในบริเวณหม้อต้มซ้ำ (reboiler) และหอดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	20
ตารางที่ 2.10 ผลของการเติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ ต่อการเกิดออกซิเดชันในสารละลายโมโนเอทานอลามีน 3 โมลาร์	21
ตารางที่ 2.11 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในกรดแอสติกที่มีความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน ในกรณีที่ไม่มีสารยับยั้งการกัดกร่อนและมีสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด A ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร	26
ตารางที่ 2.12 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในกรดแอสติกที่มีความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน ในกรณีที่ไม่มีสารยับยั้งการกัดกร่อนและมีสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด B ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร	27
ตารางที่ 2.13 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในกรดแอสติกที่มีความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน ในกรณีที่ไม่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน	27

ตารางที่ 2.14 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในกรดแอสติกที่มีความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน ในกรณีที่ไม่มีการกัดกร่อนและมีสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด A ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร	28
ตารางที่ 2.15 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในกรดแอสติกที่มีความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน ในกรณีที่ไม่มีการกัดกร่อนและมีสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด B ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร	28
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	30
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของเหล็กกล้าคาร์บอน A283	31
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L.....	31
ตารางที่ 4.1 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ใน 20% สารละลายกรดโพโรไฟอิก ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน	42
ตารางที่ ก.1 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1).....	52
ตารางที่ ก.2 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2).....	53
ตารางที่ ก.3 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3).....	54
ตารางที่ ก.4 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1).....	55
ตารางที่ ก.5 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2).....	56

ตารางที่ ก.19 ชิ้นงานเหล็กไร้สนิม AISI 304L ใน 20% สารละลายกรดโพรฟิโอนิก ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน.....	70
ตารางที่ ข.1 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทาโนลามีน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1).....	71
ตารางที่ ข.2 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทาโนลามีน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2).....	72
ตารางที่ ข.3 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทาโนลามีน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3).....	73
ตารางที่ ข.4 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)	74
ตารางที่ ข.5 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)	75
ตารางที่ ข.6 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)	76
ตารางที่ ข.7 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 4)	77
ตารางที่ ข.8 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 5).....	77
ตารางที่ ข.9 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)	78
ตารางที่ ข.10 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2).....	79
ตารางที่ ข.11 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3).....	80

ตารางที่ ค.15 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโพนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 4)... 105	
ตารางที่ ค.16 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโพนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 5)... 106	
ตารางที่ ค.17 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโพนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)... 107	
ตารางที่ ค.18 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโพนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)... 108	
ตารางที่ ค.19 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโพนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)... 109	
ตารางที่ ค.20 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโพนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 4)... 110	
ตารางที่ ค.21 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโพนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 5)... 111	
ตารางที่ ค.22 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ใน 20% สารละลายกรดโพรไฟโพนิก ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน (ครั้งที่ 1) 112	
	
ตารางที่ ง.1 ค่า pH ของสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน 113	
ตารางที่ ง.2 ค่า pH ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน 113	
ตารางที่ ง.3 ค่า pH ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโพนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน..... 114	

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันของสนิมเหล็ก	5
รูปที่ 2.2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิกของข้อต่อเหล็กเมื่อเชื่อมกับทองแดง	6
รูปที่ 2.3 การกัดกร่อนแบบสกัดเฉพาะที่ที่มีการสูญเสียสังกะสีในทองเหลือง	7
รูปที่ 2.4 การทำปฏิกิริยาของสารยับยั้งการกัดกร่อนในน้ำมัน	15
รูปที่ 2.5 การทดสอบแบบจุ่ม	18
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของแอลคาโนลามีน	19
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของอะเซทิลีน	21
รูปที่ 2.8 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A106 ในสารละลายโมโนเอทาโนลามีน 30% โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณ CO ₂ แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 80°C และ 120°C	22
รูปที่ 2.9 พื้นที่ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน A106 ที่ 0.53C/N ที่มีสารละลายโมโนเอทาโนลามีน 30% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา (a) 50 ชั่วโมง (b) และ (c) 125 ชั่วโมง (d) และ (e) 383 ชั่วโมง	23
รูปที่ 2.10 พื้นที่ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน A106 ที่ 0.53C/N ที่มีสารละลายโมโนเอทาโนลามีน 30% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา (a) (b) และ (c) 150 (d) และ (e) 595 ชั่วโมง	24
รูปที่ 3.1 เครื่องมือทดสอบการกัดกร่อนแบบจุ่ม	31
รูปที่ 4.1 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทาโนลามีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน	35
รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทาโนลามีน ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน	35
รูปที่ 4.3 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน	36
รูปที่ 4.4 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน	37

รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน.....	37
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน	38
รูปที่ 4.7 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน.....	39
รูปที่ 4.8 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน	40
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน	40
รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน	41
รูปที่ 4.11 XRD patterns ของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน.....	43
รูปที่ 4.12 XRD patterns ของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน.....	44
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 (a), ชิ้นงานใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น (b,c), ชิ้นงานใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วน 100:5 ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น (d) และชิ้นงานใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกในสภาวะไอสารละลาย (e).....	46
รูปที่ จ.1 XRD patterns ของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่น ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้นและไอสารละลาย ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน	115

รูปที่ จ.2 XRD patterns ของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรฟิโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ในสภาวะไอสารละลาย ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน..... 115



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โลหะเป็นวัสดุที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ที่สามารถดำเนินชีวิตประจำวันได้ เมื่อใช้งานโลหะเป็นเวลานานๆ จะเกิดความเสียหายที่เรียกว่า การกัดกร่อน ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจในเรื่องการซ่อมบำรุงหรือการเปลี่ยนวัสดุ จึงมีแนวทางในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะที่สำคัญวิธีหนึ่งคือ การใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน

บริษัทระยองวิศวกรรมและซ่อมบำรุง จำกัด เป็นบริษัทในเครือกลุ่มเอสซีจี เคมิคอลส์ ทำหน้าที่ตรวจสอบซ่อมบำรุงโรงงานในเครื่องที่ผลิตสารเคมี พลาสติก และผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม โรงงานในเครื่องบางแห่งมีการใช้ไอน้ำเป็นแหล่งพลังงาน บริษัทฯ ตรวจพบว่าระบบผลิตไอน้ำที่อุณหภูมิ 170°C ความดัน 7 bar ซึ่งมีกรดแอสติก (CH_3COOH) เจือปน 60 ppm และกรดโพโรไฟอิก ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) เจือปน 10 ppm เกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L แบบจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งขึ้น (liquid phase) จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครั้งหนึ่ง (liquid and vapor phase) และอยู่ในไอสารละลาย (vapor phase) ทำให้ต้องหยุดกระบวนการผลิตเพื่อซ่อมบำรุงบ่อยครั้ง บริษัทฯ สนใจวิธีการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L โดยใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน ซึ่งบริษัทฯ ได้สั่งซื้อสารยับยั้งการกัดกร่อนจากผู้ผลิตที่เสนอขาย และบริษัทฯ ต้องการทราบผลประสิทธิภาพสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ทางผู้ผลิตเสนอขายเพื่อช่วยแก้ปัญหาการกัดกร่อนแบบจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งขึ้น จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครั้งหนึ่ง และอยู่ในไอสารละลายที่เกิดขึ้นในระบบไอน้ำเพื่อลดปัญหาในการซ่อมบำรุงและเวลาการหยุดกระบวนการผลิตให้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้นต่างกันในการละลายกรดโพโรไฟอิก

1.2.2 เพื่อศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งขึ้น จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครั้งหนึ่ง และอยู่ในไอสารละลายของสารละลายกรดโพโรไฟอิก

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้า

1.3.1.1 ทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีความเข้มข้นของสารละลายโมโนเอทานอลามีน ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) ในอัตราส่วน 30%, 45%, 60%, 75% และ 90% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

1.3.1.2 ทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่น น้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 30-60% โดยน้ำหนัก) และน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 60-100% โดยน้ำหนัก) โดยอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อสารยับยั้งการกัดกร่อนเป็น 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

1.3.1.3 ทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีความเข้มข้นของกรดโพรไฟโอนิก 5% โดยปริมาตร ในกรณีที่ไม่มีสารยับยั้งการกัดกร่อนและกรณีที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน ซึ่งสารยับยั้งการกัดกร่อนแบ่งออกเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน B และสารยับยั้งการกัดกร่อน A โดยอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อสารยับยั้งการกัดกร่อนเป็น 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

1.3.1.4 ทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในน้ำกลั่นที่มีความเข้มข้นของกรดโพรไฟโอนิก 20% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน

1.3.2 ทดสอบการกัดกร่อนในสภาพการกัดกร่อนแบบจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง และอยู่ในไอสารละลาย

1.3.3 การวัดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าทำโดยการชั่งน้ำหนัก ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 4 ตำแหน่ง จากนั้นคำนวณอัตราการกัดกร่อน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพสารยับยั้งการกัดกร่อน

1.3.4 วิเคราะห์สภาพผิวเหล็กกล้าคาร์บอน A283 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ที่ถูกการกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

1.3.5 วิเคราะห์ออกไซด์ของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ที่ถูกการกัดกร่อนด้วย X-ray diffraction (XRD)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 การใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนที่มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีนสามารถแก้หรือลดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสารละลายกรดโพรไฟโอนิก

1.4.2 ทราบผลการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครั้งหนึ่ง และอยู่ในไอสารละลายของสารละลายกรดโพรไฟโอนิก



บทที่ 2

ปรีทรรศน์วรรณกรรม

2.1 การกัดกร่อนของโลหะ [1-3]

การกัดกร่อน (Corrosion) คือ ความเสียหายของวัสดุที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างวัสดุกับสิ่งแวดล้อมหรือเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ทำให้วัสดุมีสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และรูปร่างลักษณะการใช้งานที่แย่งลง

การกัดกร่อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างวัสดุกับสิ่งแวดล้อม จะเกิดในสภาวะแวดล้อมที่เป็นบรรยากาศ น้ำ กรด และเบส ซึ่งการกัดกร่อนในบรรยากาศเกิดจากความชื้นที่มีแก๊สออกซิเจน (O_2) ละลายอยู่หรือมีสารอื่นๆ เช่น สารประกอบกำมะถัน (S) และเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โดยที่เกลือโซเดียมคลอไรด์จะเกิดการกัดกร่อนในบรรยากาศน้ำทะเล ส่วนสารประกอบกำมะถัน เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) จะเกิดการกัดกร่อนในอุตสาหกรรม

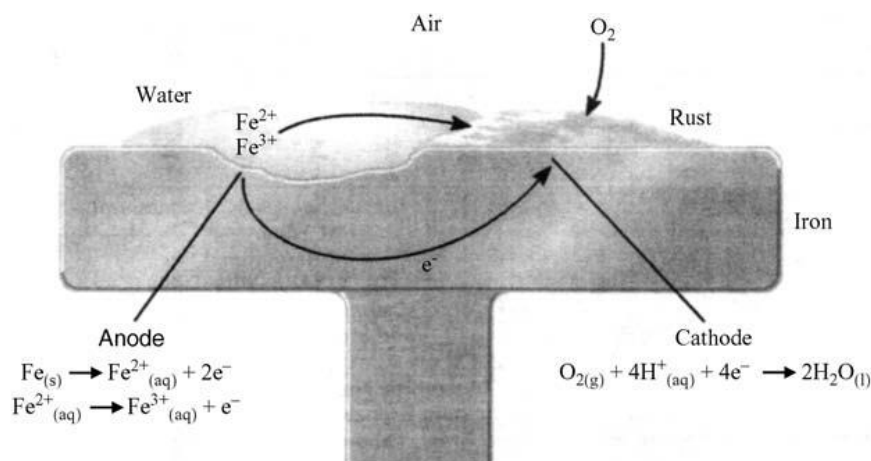
การกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เกิดจากปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่งซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือแอโนดอย่างน้อยหนึ่งปฏิกิริยาและปฏิกิริยารีดักชันหรือแคโทดอย่างน้อยหนึ่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ การสูญเสียอิเล็กตรอน เรียกส่วนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันว่า ขั้วแอโนด (anode) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ถูกรกัดกร่อน เช่น โลหะสมมติ M มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน n ตัว เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตามสมการที่ 2.1



ส่วนปฏิกิริยารีดักชัน คือ การรับอิเล็กตรอน เรียกส่วนที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันว่า ขั้วแคโทด (cathode) เช่น โลหะสมมติ M มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน n ตัว เกิดปฏิกิริยารีดักชันตามสมการที่ 2.2



นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของไอออนจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่งจะต่อด้วยตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งคู่ขั้วไฟฟ้าแต่ละคู่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่างกันทำให้เป็นแรงขับเคลื่อน (driving force) ในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีขึ้น



รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันของสนิมเหล็ก [2]

2.2 รูปแบบการกัดกร่อนของโลหะ [1-3]

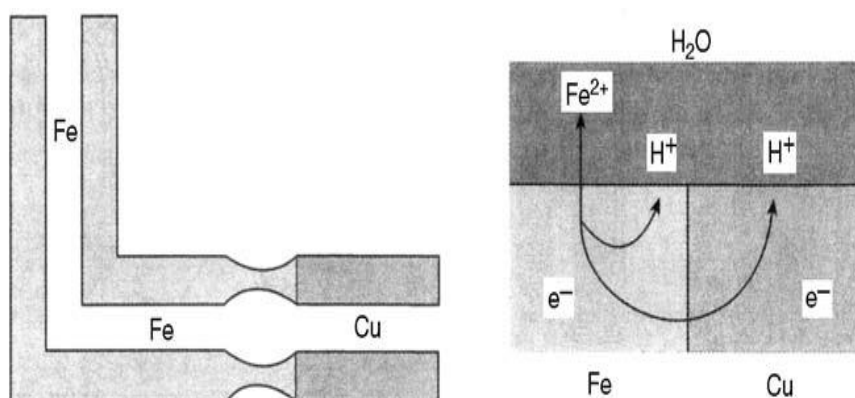
รูปแบบการกัดกร่อนของโลหะแบ่งตามลักษณะการกัดกร่อนที่พบเห็น ได้ดังนี้ การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion) การกัดกร่อนในซอก (Crevice Corrosion) การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion Cracking) การกัดกร่อนที่ขอบเกรน (Intergranular Corrosion) การกัดกร่อนแบบสกัดเฉพาะที่ (Selective Leaching) การกัดกร่อนเนื่องจากการไหล (Erosion Corrosion) และการเปราะของโลหะเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen Embrittlement)

2.2.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion)

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ เป็นการกัดกร่อนที่พบเห็นได้ทั่วไปโดยเกิดการกัดกร่อนทั่วพื้นผิวโลหะ เช่น การหมองของเครื่องเงิน การกัดกร่อนชนิดนี้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้โดยใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนหรือการป้องกันแบบแคโทดิก

2.2.2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion)

การกัดกร่อนแบบกัลวานิก เกิดจากโลหะสองชนิดที่มาสัมผัสกันมีส่วนผสมทางเคมีต่างกัน โดยโลหะที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเป็นแอโนดและเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ส่วนโลหะที่เสถียรกว่าจะเป็นแคโทดเกิดการกัดกร่อนได้ยากกว่า เช่น บริเวณรอยต่อของเหล็ก (Fe) กับทองแดง (Cu) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 บริเวณข้อต่อของเหล็กจะถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าเมื่อเชื่อมกับทองแดง



รูปที่ 2.2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิกของข้อต่อเหล็กเมื่อเชื่อมกับทองแดง [2]

วิธีป้องกันการกัดกร่อนแบบกัลวานิก ได้แก่ หลีกเลี่ยงการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน ถ้าใช้โลหะต่างชนิดกัน ให้ใช้โลหะที่มีอนุกรมกัลวานิก (E_{corr}) ใกล้เคียงกัน ใช้ฉนวนไฟฟ้ากั้นระหว่างโลหะทั้งสอง ทำการต่อโลหะชนิดที่สามที่เป็นแอโนดเมื่อเทียบกับโลหะทั้งสองชนิดเข้ากับโลหะทั้งสองชนิดหรือใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน

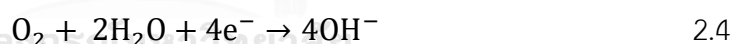
2.2.3 การกัดกร่อนในซอก (Crevice Corrosion)

การกัดกร่อนในซอก มักเกิดบริเวณซอก บริเวณที่มีสิ่งสกปรกหรือบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นผิวของโลหะกับอโลหะ

กลไกการกัดกร่อนในซอก บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดตามสมการที่ 2.3



ส่วนปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดตามสมการที่ 2.4



วิธีป้องกันการกัดกร่อนในซอก คือ ใช้วิธีการเชื่อมแทนการใช้หมุดย้ำหรือน็อต ออกแบบภาชนะไม่ให้มีบริเวณที่สารละลายหยุดนิ่งและการหลงเหลือของสาร

2.2.4 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion)

การกัดกร่อนแบบรูเข็ม เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่มีลักษณะเป็นรูเล็กๆ กินลึกเข้าไปจากผิว การกัดกร่อนลักษณะนี้จะสูญเสียเนื้อวัสดุน้อยมาก รูเข็มที่มีความลึกมากจะมีความเข้มข้นของสารละลายที่มาก และรูเข็มที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากรอยร้าวที่ผิว เช่น รอยขีดข่วน ดังนั้นผิวที่ผ่านการขัดเงาจะมีความต้านทานในการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

2.2.5 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion Cracking)

การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น เป็นผลมาจาการรอยแตกของวัสดุที่เกิดจากความเค้นร่วมกับสภาวะที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ความเค้นที่ทำให้เกิดรอยแตก อาจไม่ใช่ความเค้นจากภายนอกเพียงอย่างเดียว อาจเกิดจากความเค้นเหลือค้างที่มาจาก การเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างรวดเร็วหรือโครงสร้างของโลหะ

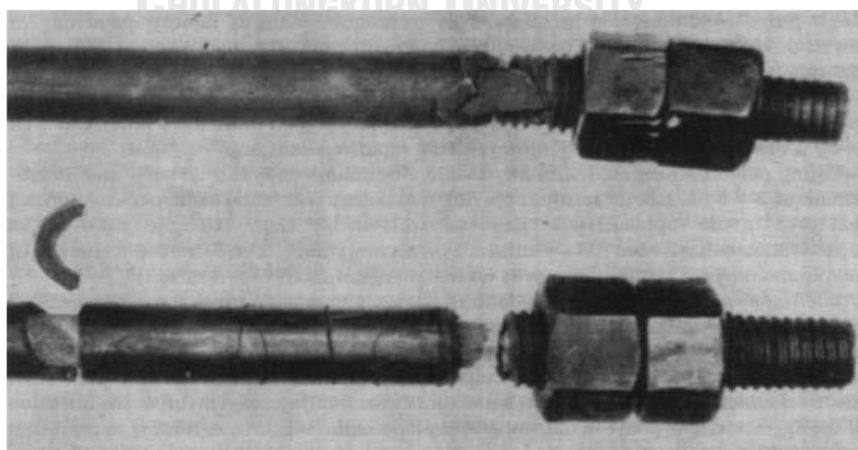
2.2.6 การกัดกร่อนที่ขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

การกัดกร่อนที่ขอบเกรน จะเกิดบริเวณขอบเกรนของโลหะ การกัดกร่อนลักษณะนี้ มักเกิดกับเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมกลายเป็นสภาพที่ว่องไว (sensitized) ที่เกิดอนุภาคโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_{23}C_6) ขึ้น การแพร่โครเมียม (Cr) และคาร์บอน (C) ไปยังบริเวณขอบเกรนเพื่อสร้างตะกอนคาร์ไบด์ ทำให้ขาดโครเมียม (chromium depleted zone) ที่บริเวณขอบเกรน ส่งผลให้บริเวณขอบเกรนเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย

วิธีป้องกันการกัดกร่อนที่ขอบเกรน คือ อบชุบเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000°C เพื่อละลายอนุภาคโครเมียมคาร์ไบด์ หรือใช้เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.03% เพื่อลดการเกิดคาร์ไบด์ และผสมธาตุไนโอเบียม (Nb) หรือไทเทเนียม (Ti) ในเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อให้เกิดสารประกอบคาร์ไบด์แทนโครเมียม

2.2.7 การกัดกร่อนแบบสกัดเฉพาะที่ (Selective Leaching)

การกัดกร่อนแบบสกัดเฉพาะที่ พบในโลหะที่มีการละลายแบบแทนที่ และเกิดขึ้นเมื่อมีธาตุหนึ่งถูกกัดกร่อนออกมา เช่น การสูญเสียสังกะสี (Zn) ในทองเหลือง (dezincification) ทำให้สมบัติทางกลแย่ง นอกจากนั้นทองเหลืองมีการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีแดงของทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การกัดกร่อนแบบสกัดเฉพาะที่ที่มีการสูญเสียสังกะสีในทองเหลือง [2]

2.2.8 การกัดกร่อนเนื่องจากการไหล (Erosion Corrosion)

การกัดกร่อนเนื่องจากการไหล เป็นความเสียหายที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรือการขัดสีจากการไหลของของไหล ลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นร่องและคลื่นที่ผิว ถ้ามีอนุภาคของแข็งในของไหลจะช่วยเพิ่มการกัดกร่อนให้รุนแรงขึ้น การกัดกร่อนเนื่องจากการไหลพบในท่อที่มีส่วนโค้ง ส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างรวดเร็วหรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนทิศทางการไหล

วิธีป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากการไหล ได้แก่ ออกแบบชิ้นงานเพื่อลดการไหลแบบปั่นป่วนและการกระแทก

2.2.9 การเปราะของโลหะเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen Embrittlement)

การเปราะของโลหะเนื่องจากไฮโดรเจน เป็นความเสียหายที่เกิดจากอะตอมของไฮโดรเจน (H) เข้าไปแทรกในโครงสร้างผลึกทำให้เกิดรอยแตกขึ้น ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน หรือเกิดจากแรงดันของแก๊สไฮโดรเจนไปกระทำกับผิวหน้าที่มีจุดบกพร่องช่วยเสริมแรงเค้นที่กระทำต่อวัสดุ ทำให้ความเค้นรวมมีค่ามากกว่าความเค้นที่ทำให้เกิดรอยร้าว จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยแตกขึ้น

สิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการเปราะของโลหะเนื่องจากไฮโดรเจน ได้แก่ การกัดผิวเหล็กกล้าด้วยกรดซัลฟิวริก การชุบด้วยไฟฟ้า และการมีบรรยากาศไฮโดรเจน

วิธีป้องกันการเปราะของโลหะเนื่องจากไฮโดรเจน ได้แก่ การนำแหล่งกำเนิดไฮโดรเจนออก การอบ (baking) โลหะที่อุณหภูมิสูงเพื่อไล่แก๊สไฮโดรเจน และใช้โลหะที่ทนทานต่อการเกิดการเปราะของโลหะเนื่องจากไฮโดรเจน

2.3 อัตราการกัดกร่อน [1, 3-6]

อัตราการกัดกร่อน คือ อัตราที่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุหลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งเป็นค่าอัตราการกัดกร่อนแทรกซึม (Corrosion penetration rate (CPR)) หรือความหนาที่ลดลงต่อเวลาสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5

$$CPR = \frac{KW}{\rho At} \quad 2.5$$

โดยที่ W คือ น้ำหนักที่หายไป (g)

ρ คือ ความหนาแน่น (g/cm^3)

A คือ พื้นที่ผิว (cm^2)

t คือ เวลา (h)

K คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับระบบ

ตารางที่ 2.1 ค่า K ของการกัดกร่อนในแต่ละหน่วยของอัตราการกัดกร่อน [4]

หน่วยของอัตราการกัดกร่อน	ค่าคงที่ K ในสมการอัตราการกัดกร่อน
mils per year (mpy)	3.45×10^6
inches per year (ipy)	3.45×10^3
inches per month (ipm)	2.87×10^2
millimeters per year (mm/y)	8.76×10^4
micrometers per year ($\mu m/y$)	8.76×10^7
picometers per second (pm/s)	2.78×10^6
grams per square meter per hour ($g/m^2 \cdot h$)	$1.00 \times 10^4 \times D$
milligrams per square decimeter per day (mdd)	$2.40 \times 10^6 \times D$
micrograms per square meter per second ($\mu g/m^2 \cdot s$)	$2.78 \times 10^6 \times D$

ตารางที่ 2.2 ความรุนแรงของการกัดกร่อนในแต่ละหน่วยของอัตราการกัดกร่อน [1]

ความต้านทานการกัดกร่อนสัมพัทธ์	mpy	mm/yr	$\mu\text{m}/\text{yr}$	nm/h	pm/s
Outstanding	< 1	< 0.02	< 25	< 2	< 1
Excellent	1-5	0.02-0.1	25-100	2-10	1-5
Good	5-20	0.1-0.5	100-500	10-50	20-50
Fair	20-50	0.5-1	500-1000	50-150	20-50
Poor	50-200	1-5	1000-5000	150-500	50-200
Unacceptable	200+	5+	5000+	500+	200+

^aBased on typical ferrous and nickel alloys. Rates greater than 5 to 20 mpy are usually excessive for more expensive alloys, while rates above 200 mpy are sometimes acceptable for cheaper materials (e.g., cast iron) of thicker cross section.

2.4 การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ [3]

วิธีป้องกันการกัดกร่อนของโลหะที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ การเลือกวัสดุ การเปลี่ยนสภาพแวดล้อม การออกแบบชิ้นงาน การเคลือบผิว การป้องกันแบบแคโทดิก และการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน

2.4.1 การเลือกวัสดุ เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด โดยเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม ซึ่งการเลือกวัสดุที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจะมีปัจจัยเรื่องราคาเข้ามาเกี่ยวข้อง

2.4.2 การเปลี่ยนสภาพแวดล้อม เช่น การลดอุณหภูมิ การลดอัตราเร็วการไหล (flow velocity) การลดความเข้มข้นของสารละลายหรือในบางกรณีมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย มีผลทำให้อัตราการกัดกร่อนเกิดช้าลง

2.4.3 การออกแบบชิ้นงาน ควรออกแบบชิ้นงานให้สามารถระบายการไหลได้ ทำความสะอาดได้ง่าย และป้องกันอากาศไม่ให้เข้าสู่ระบบ ถ้าอากาศเข้าสู่ระบบจะทำให้การกัดกร่อนเกิดได้ง่าย เช่น ออกซิเจนจะช่วยเพิ่มการกัดกร่อน

2.4.4 การเคลือบผิว เป็นการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้สารเคลือบผิว ซึ่งสารเคลือบผิวต้องเกาะติดกับผิวโลหะดีและไม่ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม

2.4.5 การป้องกันแบบแคโทดิก คือ การให้อิเล็กตรอนจากแหล่งภายนอกแก่โลหะที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อน โดยให้โลหะชนิดนั้นกลายเป็นขั้วแคโทด เช่น การต่อวงจรไฟฟ้าของโลหะที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อนกับโลหะอีกชนิดหนึ่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี เรียกโลหะที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีว่า แอโนดสลับเปลี่ยน (Sacrificial anode)

2.5 สารยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibitors) [1-3]

สารยับยั้งการกัดกร่อนเป็นสารที่ใช้องกันการกัดกร่อนเพื่อลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิก แคโทดิก หรือทั้งแอโนดิกและแคโทดิก สารยับยั้งการกัดกร่อนบางชนิดจะไปทำปฏิกิริยากับสารที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเพื่อลดปริมาณออกซิเจนในสารละลาย บางชนิดไปจับกับผิวโลหะที่เกิดการกัดกร่อนเพื่อขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิก แคโทดิก หรือมีการสร้างชั้นฟิล์มบางๆ เคลือบที่ผิว

สารยับยั้งการกัดกร่อนสามารถป้องกันการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับน้ำ สารละลายกรด และน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 2.3 สารยับยั้งการกัดกร่อนในแต่ละสภาวะแวดล้อมมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนที่แตกต่างกัน โดยที่ความเข้มข้นของสารยับยั้งการกัดกร่อนส่งผลต่อประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อน และสามารถคำนวณประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนได้ดังสมการที่ 2.6

$$I_{\text{eff}} = \frac{R_0 - R_i}{R_0} \times 100 \quad 2.6$$

โดยที่ I_{eff} คือ ประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อน

R_0 คือ อัตราการกัดกร่อนของโลหะที่ไม่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน

R_i คือ อัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน

ตารางที่ 2.3 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในสภาพแวดล้อมต่างๆ [1]

สภาพแวดล้อม	ตัวอย่างของสารยับยั้งการกัดกร่อน
Waters	
Potable water	CaCO ₃ deposition, silicates, polyphosphates, zinc salts
Recirculating cooling water	Chromate, nitrate at 300-500 ppm calcium polyphosphates at 15-37 ppm silicates at 20-40 ppm
Automotive Coolants	Nitrite, benzoate, borax, phosphate sodium mercaptobenzothiazole, benzotriazole
Steam Condensates	Neutralizers: ammonia, morpholine, cyclohexamine, Benzylamine long chain aliphatic amines such as octdecylamine at 1-3 ppm
Brines and Seawater	Refrigeration brines: chromates, 2000-3300 ppm diluted seawater: sodium nitrite, 3-10% hot desalting brines: mixed chromate and phosphate, 50-100 ppm
Acid Pickling Solutions	
Sulfuric acid	Phenylthiourea, di-ortho-tolyl-thiourea, mercaptans, sulfides, 0.003-0.01%
Hydrochloric acid	Pyridine, quinoline, various amines, decylamine, phenylthiourea, dibenzylsulfoxides
Oil Production and Refining	
Primary and Secondary	Fatty imidazolines, various amines including primary amine, diamines, amido-amines, oxyethylated primary amines, alkyl
Recovery	pyridines, quaternized amines
Refining	Imidazoline and derivatives

2.6 สารยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายกรดและน้ำมัน [2, 7, 8]

สารละลายกรดและน้ำมันถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมโดยกรดที่ใช้บ่อยที่สุด เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดไนตริก (HNO₃) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กรดซัลฟูริก (C₆H₈O₇) กรดฟอร์มิก (CH₂O₂) กรดซัลฟิวริก และกรดแอสซิติค ซึ่งจำเป็นต้องมีสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในอุตสาหกรรม โดยสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของกรด ความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ อัตราเร็วการไหล และชนิดของวัสดุที่สัมผัสกับกรด ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ถึง ตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.4 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก [2]

สารละลาย	ชนิดโลหะ	สารยับยั้งการกัดกร่อน
HCl	Iron, steel	Primary, secondary, and tertiary amines, oximes, nitriles, mercaptans, sulfoxides, thioureas, complexones
	Copper, brass	Thiourea, benzimidazoles, 2-mercapto-benzothiazole, phenyl thiourea
1 M HCl + 2.5% NaCl	Al and its alloys	Aliphatic, aromatic aldehydes, carboxylic acids, ketones, sulfonamides, sulfones, dihydric phenols, tetrazolinium compounds, formazan compounds, sulfoxides, aromatic sulfonic acids, cupferron, N-allylthiourea, dibenzoyl sulfoxide
HCl + H ₃ PO ₄ (IN) 10%		p-Thiocresol and sodium diethyl
HCl		dithiocarbamate Mixture of aromatic aldehyde, 1 M urea/triethylamine/dodecylamine, >1 M thiourea, and 1-hexyn-3-ol together with alkyl sulfonates
HCl	Zn	Inhibitors used for Al are satisfactory
5.6 M HCl	Nickel	Thiourea and its derivatives; o-tolyl thiourea and sym-diisopropyl thiourea gave 90% inhibition over a wide temperature range
HCl	Titanium and its alloys	Copper sulfate, nitric acid, and chromic acid at 0.5-1.0% act as inhibitors, Nitrobenzene, trinitrobenzoic acid, picric acid, benzene arsenic acid, at 0.03-0.003 M

ตารางที่ 2.5 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในสารละลายกรดซัลฟิวริก [2]

โลหะ	สารยับยั้งการกัดกร่อน
Steel	2-Mercaptobenzimidazole 2-Mercaptobenzimidazole with propargyl alcohol or 1-hexyn-3-ol; sulfonium compounds at low temperatures Amine/quaternary ammonium salts with halides Cl ⁻ /Br ⁻ /I ⁻ show synergistic effect p-Alkylbenzyl pyridinium halides and p-alkylbenzyl quinolinium halides with 0.01-0.001 M KI in 5-30% H ₂ SO ₄ give good corrosion inhibition Nitrogen-containing inhibitors with SH ⁻ from H ₂ S show synergistic effect Acetylenic alcohols and acetylenic alcohols with halides
Copper	Thiourea
Brass	Quinolines, azoles
Titanium	2,4,6-Trinitrophenol, 5-nitroquinoline, 8-nitro-quinoline, o-nitrobenzene, and picric acid

ตารางที่ 2.6 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในสารละลายกรดไนตริก [2]

โลหะ	สารยับยั้งการกัดกร่อน
Ferrous metals	Propargyl mercaptan, propargyl sulfide, ethane dithiol, thioacetic acid, mercaptoacetic acid, diethyl sulfide, and thiourea in low concentration
Copper	Aliphatic and aromatic amines and diamines
Brass	Aminophenols, aminobenzoic acids, heterocyclic amines, thiourea and derivatives; p-thiocresol, o-chloroaniline, o-nitroaniline, and diethyl thiourea
Titanium	Silicone oil in 20-70% HNO ₃ reduced the corrosion rate from 1-10 mm/y to a negligible value

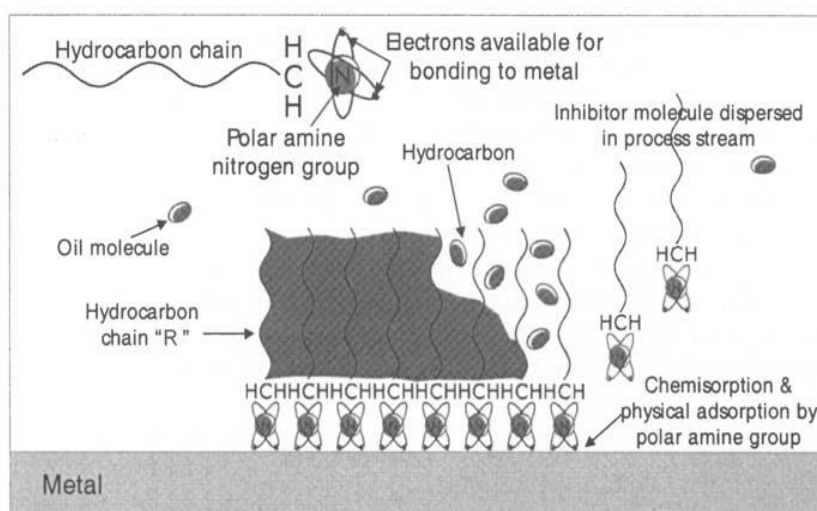
ตารางที่ 2.7 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก [2]

โลหะ	สารยับยั้งการกัดกร่อน
Ferrous metals	In 0.5-10 wt.% hydrofluoric acid, dibenzyl sulfoxide, C ₁₀ -C ₁₄ alkyl pyridinium salts, di-o-tolylthiourea, benzotriazole, mixture of thiourea and Mannich base derived from rosin amine
Ferritic steels	2-5% Thiourea in a mixture of nitric and hydrofluoric acids

ตารางที่ 2.8 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในสารละลายกรดฟอสฟอริก [2]

โลหะ	สารยับยั้งการกัดกร่อน
Steel	Benzylquinolinium thiocyanate
Steel vessels	Transport of 50-116% phosphoric acid; dodecylamine or 2-aminobicyclohexyl (0.03-0.1%) in 0.007-0.014% potassium iodide
Aluminium alloys	Urotropin and p-toluidine
Titanium	Inhibition in concentrated phosphoric acid by ammonium molybdate and potassium dichromate

รูปที่ 2.4 แสดงถึงกลไกของสารยับยั้งการกัดกร่อนที่มีหมู่ฟังก์ชันของเอมีนในการดูดซับบนพื้นผิวโลหะ สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในน้ำมันส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์และมีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.1% เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ดูดซับบนพื้นผิวโลหะและยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกและแคโทดิก สารอินทรีย์ที่ใช้ในการยับยั้งการกัดกร่อนจะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน (N) เช่น เอมีน ($-NH_2$) เอไมด์ ($C_nH_{2n+1}CONH_2$) แอมโมเนียม (NH_4^+) ไนโตรเจนกับกรดคาร์บอกซิลิก และไนโตรเจนกับสารประกอบที่มีฟอสฟอรัส (P) กำมะถัน และออกซิเจน



รูปที่ 2.4 การทำปฏิกิริยาของสารยับยั้งการกัดกร่อนในน้ำมัน [7]

การใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์ในสารละลายกรดสามารถยับยั้งหรือกระตุ้นการกัดกร่อนได้ โดยที่การกระตุ้นการกัดกร่อนไม่เกี่ยวข้องกับประเภทและโครงสร้างของโมเลกุลอินทรีย์ แต่ขึ้นอยู่กับชนิดของกรดหรือความเข้มข้นในการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์ กลไกของสารยับยั้งการกัดกร่อนในกรด คือ การดูดซับสารยับยั้งบนพื้นผิวโลหะ ซึ่งกระบวนการดูดซับสารยับยั้งขึ้นอยู่กับลักษณะและพื้นผิวของโลหะ โครงสร้างทางเคมีของสารยับยั้งและชนิดของอิเล็กโทรไลต์

สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ปกคลุมอยู่บนผิวโลหะจะมีผลต่อประสิทธิภาพการยับยั้ง ถ้าการดูดซับบนพื้นผิวโลหะเป็นแบบดูดและมีความแข็งแรงจะทำให้ประสิทธิภาพการยับยั้งสูงขึ้น แต่ถ้ามีไอออนหรือโมเลกุลที่มีขั้วที่ทำให้เกิดการผลักรันจะทำให้ประสิทธิภาพการยับยั้งลดลง

2.7 ประเภทของสารยับยั้งการกัดกร่อน [8]

ประเภทของสารยับยั้งการกัดกร่อนสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ สารยับยั้งการกัดกร่อนที่สร้างชั้นฟิล์มพาสซีฟ (Passivation inhibitors) สารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์ (Organic inhibitors) และสารยับยั้งการกัดกร่อนแบบเกิดการตกตะกอน (Precipitation inhibitors)

2.7.1 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่สร้างชั้นฟิล์มพาสซีฟ (Passivation inhibitors)

สารยับยั้งการกัดกร่อนที่สร้างชั้นฟิล์มพาสซีฟ เช่น โครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_4^{2-}$) ไนไตรต์ (NO_2^-) โซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) และโซเดียมโบรเมต (NaBrO_7) สารยับยั้งการกัดกร่อนเหล่านี้จะไปดูดซับพื้นผิวโลหะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ และสามารถเร่งการกัดกร่อนให้เกิดขึ้นได้เมื่อความเข้มข้นของสารยับยั้งการกัดกร่อนต่ำกว่าขีดจำกัด

2.7.2 สารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์ (Organic inhibitors)

สารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์จะมีหมู่ฟังก์ชันของอะตอมหรือมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวหรือมีองค์ประกอบของอะลิฟาติก (aliphatic) ไซโคลอะลิฟาติก (cycloaliphatic) อะโรมาติก (aromatic) เฮเทอโรไซคลิกเอมีน (heterocyclic amines) คาร์บามิก (carbamic) แอซีติก เบนโซอิก ($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_2$) ไนตรัส (N_2O) กรดโครมิก (H_2CrO_4) Amine salts with carbonic Organic esters Nitro derivatives และอะเซทิลีนแอลกอฮอล์ (acetylenic alcohols) ซึ่งจะสร้างชั้นฟิล์มโดยให้โมเลกุลทำพันธะและดูดซับบนพื้นผิวโลหะ โดยที่การดูดซับและความแข็งแรงของพันธะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและความสามารถของอะตอมที่ถูกทำให้เกิดขั้ว (polarizability) โดยพื้นผิวโลหะจะถูกปกคลุมด้วยสารยับยั้งการกัดกร่อนในปริมาณที่เหมาะสม เช่น การกัดกร่อนของระบบน้ำหล่อเย็นด้วยเอทิลีนไกลคอล ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$) สามารถควบคุมได้โดยใช้โมโนเอทานอลามีนในการยับยั้งการกัดกร่อน

2.7.3 สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบเกิดการตกตะกอน (Precipitation inhibitors)

สารยับยั้งการกัดกร่อนประเภทนี้จะตกตะกอนเป็นชั้นฟิล์มของสารประกอบบนพื้นผิวของโลหะ เช่น น้ำที่มีส่วนประกอบของแคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) อยู่ในสารละลาย โซเดียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$) จะเกิดตะกอนของแคลเซียมออร์โธฟอสเฟต (calcium orthophosphate) หรือแมกนีเซียมออร์โธฟอสเฟต (magnesium orthophosphate) อยู่บนพื้นผิวโลหะและสร้างชั้นฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ

2.8 พื้นฐานกลไกการยับยั้งการกัดกร่อน [1, 2, 8]

2.8.1 แบ่งตามหน้าที่ประเภทของสารยับยั้งการกัดกร่อน

กลไกการยับยั้งการกัดกร่อนสามารถแบ่งตามหน้าที่ประเภทของสารยับยั้งการกัดกร่อนได้ดังนี้ สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบแคโทดิก (Cathodic inhibitors) สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบแอโนดิก (Anodic inhibitors) และสารยับยั้งการกัดกร่อนแบบผสม (Mixed type inhibitors)

2.8.1.1 สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบแคโทดิก (Cathodic inhibitors) จะยับยั้งปฏิกิริยาแคโทดิกของไฮโดรเจนในสารละลายที่เป็นกรดหรือลดปฏิกิริยาแคโทดิกของออกซิเจนในสารละลายที่เป็นกลางหรือด่าง เช่น สารยับยั้งอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ซิลิเกต (SiO_4^{4-}) หรือบอเรต (BO_3^{2-}) ในสารละลายอัลคาไลน์จะไปลดออกซิเจนที่บริเวณแคโทดิก ส่วนสารอื่นๆ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) หรือแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกได้เช่นกัน

2.8.1.2 สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบแอโนดิก (Anodic inhibitors) จะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งช่วง pH 6.5-10.5 เช่น สารยับยั้งประเภทออกซีแอนไอออน (Oxyanions) ได้แก่ โครเมต โมลิบเดต (MoO_4^{2-}) ทังสเตท (WO_4^{2-}) และโซเดียมไนไตรต์ (NaNO_2) โดยกลุ่มออกซีแอนไอออนเหล่านี้ช่วยซ่อมแซมตำหนิของชั้นเหล็กออกไซด์บนผิวโลหะ

2.8.1.3 สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบผสม (Mixed type inhibitors) มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกและแคโทดิก เช่น สารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์ ซึ่งทำหน้าที่ดูดซับบนพื้นผิวโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่บริเวณแอโนดและลดออกซิเจนที่บริเวณแคโทดิก หมู่ฟังก์ชันที่ทำให้หน้าที่ในการยับยั้งการกัดกร่อนแบบผสม ได้แก่ เอมีน ($-\text{NH}_2$) คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) หรือฟอสโฟเนต (phosphonate)

2.8.2 แบ่งตามรูปแบบการดูดซับ

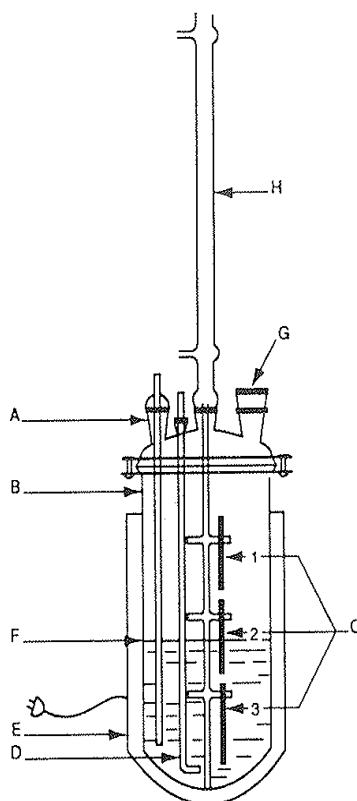
กลไกการยับยั้งการกัดกร่อนสามารถแบ่งตามรูปแบบการดูดซับระหว่างสารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์กับพื้นผิวโลหะ ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

2.8.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างไอออนของสารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์กับพื้นผิวโลหะที่มีประจุไฟฟ้า เช่น สารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์ที่มีความสามารถในการดูดซับไอออนลบ เช่น ไอออนเฮไลด์ (halide ions) จะดูดซับไอออนบวก ไอออนเหล่านี้จะดูดซับบนพื้นผิวโลหะโดยมีการจัดเรียงตัวของตัว

2.8.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เป็นการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์กับพื้นผิวโลหะ โดยการสร้างพันธะเคมี กระบวนการนี้เกิดได้ช้ากว่าการดูดซับทางกายภาพที่ใช้แรงระหว่างประจุไฟฟ้าและมีพลังงานกระตุ้นที่สูงกว่า โดยกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

2.9 การทดสอบแบบจุ่ม (Immersion tests) [1, 3, 5, 6, 8, 9]

การทดสอบแบบจุ่มเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทดสอบการกัดกร่อน เนื่องจากมีราคาถูก ทดสอบง่าย และสามารถทดสอบวัสดุพร้อมกันหลายชิ้น โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าจุ่มอยู่ในสารละลายที่เป็นภาชนะปิด ซึ่งลักษณะการจุ่มมีแบบจุ่มทั้งหมดหรือจุ่มครึ่งหนึ่งในสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ตัวแปรของสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ได้แก่ อัตราเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลาย ถ้าเพิ่มอัตราเร็วการไหล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายจะทำให้การกัดกร่อนเกิดได้ง่ายขึ้น วิธีการทดสอบนี้สามารถคำนวณอัตราการกัดกร่อนได้โดยการชั่งน้ำหนักและสามารถบ่งบอกถึงชนิดการกัดกร่อนได้

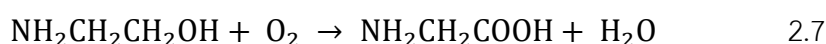


รูปที่ 2.5 การทดสอบแบบจุ่ม [9]

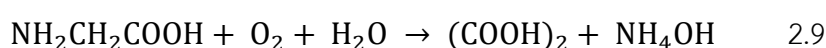
ตารางที่ 2.9 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางในสารยับยั้งการกัดกร่อน โมโนเอทานอลามีน ที่มีการเติมและไม่มีการเติมคอปเปอร์ออกไซด์ ซิงค์ซัลเฟต และทองสัมฤทธิ์ ใน บริเวณหม้อต้มซ้ำ (reboiler) และหอดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [10]

บริเวณที่ทดสอบ	อัตราการกัดกร่อน (mpy)			
	ไม่มีการเติม CuO และ ZnSO ₄	เติม CuO	เติม CuO และ ZnSO ₄	เติม CuO, ZnSO ₄ และ Bronze Pieces
Reboiler	90.00	29.49	13.38	0
Level Control Valve in Absorbing column	18.78	12.10	2.97	6.2
Solution inlet at the upper part of the stripping column	18.11	10.88	2.64	1.74
Bottom of Absorbing Column	5.27	4.05	0.25	1.08
Concentration of MEA (wt. %)	27	24-27	24-27	29-32

จากสิทธิบัตรหมายเลข 2,559,580 และ 2,377,966 [12, 13] พบว่า สารละลายโมโนเอทานอลามีน ถูกใช้ในกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมและเป็นสารละลายที่สามารถเกิดออกซิเดชันได้ง่าย เมื่อสารละลายโมโนเอทานอลามีนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะเกิดอะมิโนอาซีติกแอซิด (NH₂CH₂COOH) ขึ้น ตามสมการที่ 2.7 ซึ่งอะมิโนอาซีติกแอซิดจะทำให้เกิดการกัดกร่อน



สามารถป้องกันการเกิดอะมิโนอาซีติกแอซิดได้โดยการเติมทองแดง เช่น คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO₄) หรือคอปเปอร์คาร์บอเนต (CuCO₃) การเติมทองแดงในสารละลายโมโนเอทานอลามีน หรืออะมิโนอาซีติกแอซิดจะเกิดกรดออกซาลิก ((COOH)₂) ขึ้น ตามสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 โดยที่กรดออกซาลิกจะเกิดการกัดกร่อนน้อยกว่าอะมิโนอาซีติกแอซิด

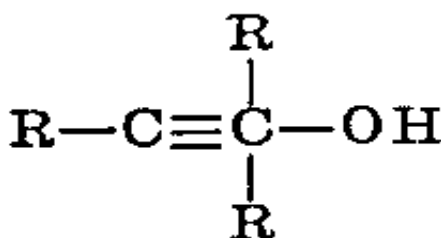


วิธีการเกิดออกซิเดชันของสารละลายโมโนเอทานอลามีนอีกวิธีหนึ่ง คือ การเติมไอออนไอโอดีน (iodine ions) เช่น โซเดียมไอโอดีน (NaI) โพแทสเซียมไอโอดีน (KI) แอมโมเนียมไอโอดีน (NH₄I) กรดไฮโดรไอโอดิก (HI) หรือ organic iodine จากตารางที่ 2.10 การเติมโพแทสเซียมไอโอดีนปริมาณ 0.001-0.5% สามารถลดอัตราการเกิดออกซิเดชันได้ถึง 96.5% ขณะที่การเติมโพแทสเซียมไอโอดีน 1% จะไปเพิ่มอัตราการเกิดออกซิเดชัน ดังนั้นการเติมไอออนไอโอดีนควรเติมปริมาณที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเพิ่มอัตราการเกิดออกซิเดชัน

ตารางที่ 2.10 ผลของการเติมโพแทสเซียมไอโอดีน ต่อการเกิดออกซิเดชันในสารละลายโมโนเอทานอลามีน 3 โมลาร์ [12]

ปริมาณการเติมโพแทสเซียมไอโอดีน (%)	สารละลายเอมีนที่ถูกออกซิไดซ์ (%)	การลดลงของอัตราการเกิดออกซิเดชัน (%)
None	11.3	0.0
0.001	11.2	0.9
0.01	5.8	48.7
0.05	4.1	63.7
0.1	0.7	93.8
0.5	0.4	96.5
1.0	0.5	95.6

จากสิทธิบัตรหมายเลข 3,773,465 [14] พบว่า สารยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะในกรดจะมีองค์ประกอบของไนโตรเจน และองค์ประกอบของอะเซทิลีน (acetylenic) โดยองค์ประกอบของอะเซทิลีน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



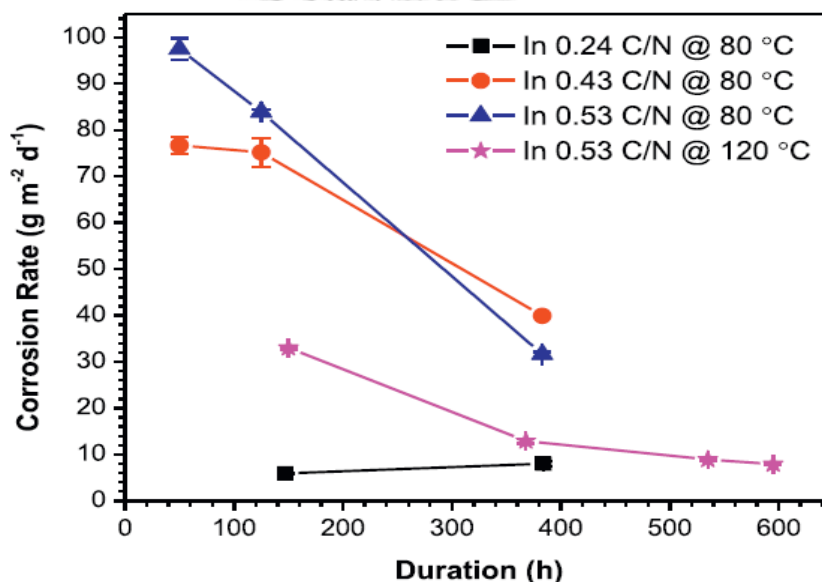
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของอะเซทิลีน [14]

โดยที่ R คือ ไฮโดรเจน แอลคิล (alkyl) หรือฟีนิล (phenyl)

สารยับยั้งการกัดกร่อนเหล่านี้สามารถลดการกัดกร่อนของโลหะในกรดได้ เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดฟลูออริก และกรดซัลฟิวริก ที่มีค่า pH ประมาณ 6.5 หรือประมาณ 35% โดยน้ำหนัก ในช่วงอุณหภูมิ 150-450°F โดยที่ความเข้มข้นของสารยับยั้งการกัดกร่อนที่อุณหภูมิ 150°F

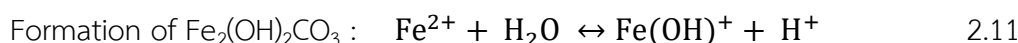
จะใช้ปริมาณ 0.1% โดยปริมาตร ส่วนอุณหภูมิ 450°F จะใช้ปริมาณ 2.5% โดยปริมาตร พบว่าสารยับยั้งการกัดกร่อนมีประสิทธิภาพในการยับยั้งที่ตีที่อุณหภูมิประมาณ 200°F และการเติมทองแดง เช่น คอปเปอร์ออกไซด์และคอปเปอร์คลอไรด์ (CuCl_2) ลงไปในกรด สามารถป้องกันการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงได้ ส่วนการเติมอาร์เซนิก (As) สามารถป้องกันการกัดกร่อนสำหรับกรณีบ่อน้ำมัน (oil wells) ได้

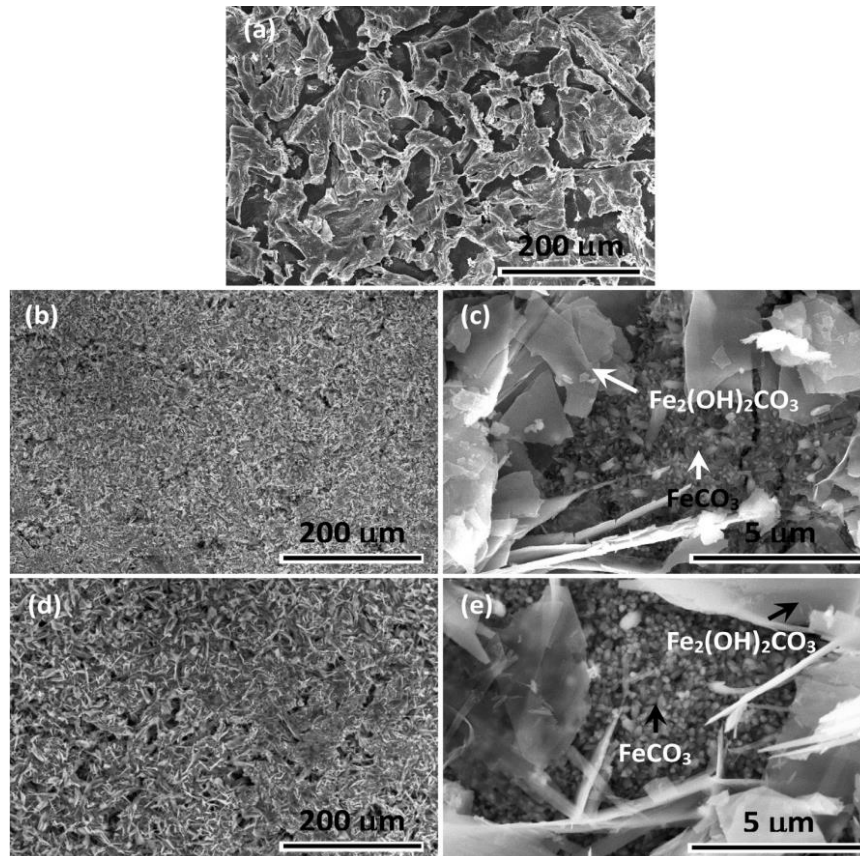
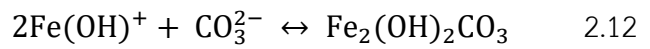
Liangfu et al. [15] ศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A106 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 80°C และ 120°C พบว่า อัตราการกัดกร่อนที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 loading, mol CO_2 /mol NH_2) 0.53 ที่อุณหภูมิ 120°C มีอัตราการกัดกร่อนที่น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 80°C และที่อุณหภูมิ 80°C อัตราการกัดกร่อนลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ขณะที่อุณหภูมิ 120°C อัตราการกัดกร่อนลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A106 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน 30% โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณ CO_2 ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 80°C และ 120°C [15]

จากรูปที่ 2.9 ที่เวลา 50 ชั่วโมง มีอัตราการกัดกร่อนที่สูง เนื่องจากมีโคฮีไนต์หรือซีเมนไทต์ (Fe_3C) คงค้างอยู่ในโลหะและไม่มี การสร้างชั้นฟิล์มของซูคาโนไวท์ ($\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$) และซีเดอไรท์ (FeCO_3) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะเกิดชั้นฟิล์มของ $\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ และ FeCO_3 อยู่บนผิวโลหะ ทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง การเกิดชั้นฟิล์มของ FeCO_3 ดังแสดงในสมการที่ 2.10 และการเกิดชั้นฟิล์มของ $\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ดังแสดงในสมการที่ 2.11 และสมการที่ 2.12

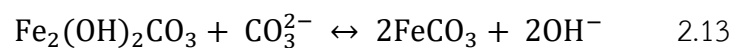




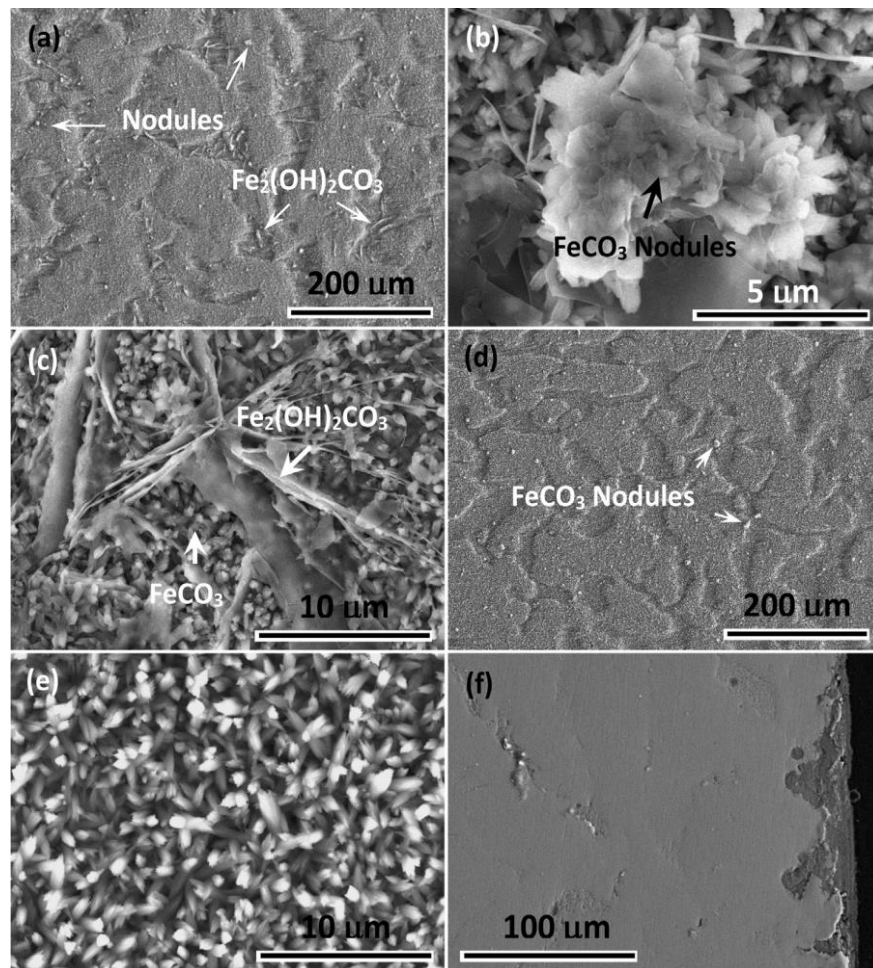
รูปที่ 2.9 พื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน A106 ที่ 0.53C/N ที่มีสารละลายโมโนเอทาโนลามีน 30% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา (a) 50 ชั่วโมง (b) และ (c) 125 ชั่วโมง (d) และ (e) 383 ชั่วโมง [15]

จากรูปที่ 2.10 ที่เวลา 150 ชั่วโมง จะประกอบด้วยชั้นฟิล์มของ FeCO₃ และ Fe₂(OH)₂CO₃ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นถึง 595 ชั่วโมง ชั้นฟิล์มของ Fe₂(OH)₂CO₃ จะไม่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวโลหะ โดยชั้นฟิล์มของ Fe₂(OH)₂CO₃ จะเปลี่ยนเป็น FeCO₃ ซึ่งเป็นเฟสที่เสถียร ดังแสดงในสมการที่ 2.13

Transformation from Fe₂(OH)₂CO₃ into FeCO₃ :

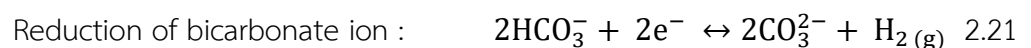
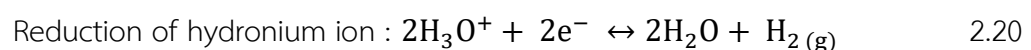
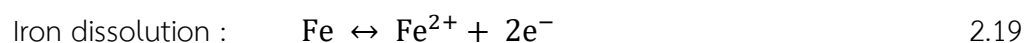
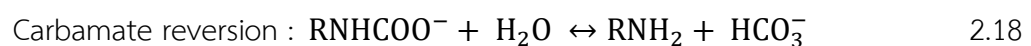
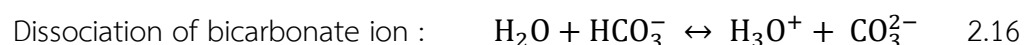
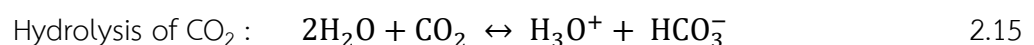
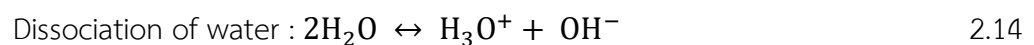


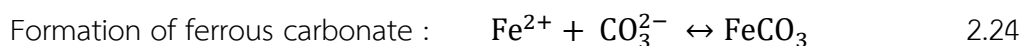
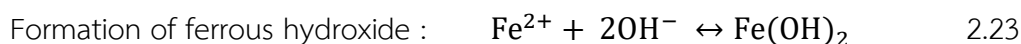
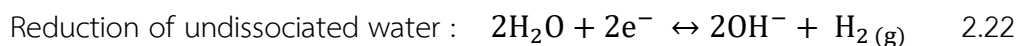
การเกิดชั้นฟิล์มของ FeCO₃ และ Fe₂(OH)₂CO₃ จะช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A106



รูปที่ 2.10 พื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน A106 ที่ 0.53C/N ที่มีสารละลายโมโนเอทานอลามีน 30% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา (a) (b) และ (c) 150 (d) และ (e) 595 ชั่วโมง [15]

Immanuel et al. [16] ศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน 1018 ในกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีน ที่อุณหภูมิ 80°C พบ กลไกการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน 1018 ในกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับสารละลายโมโนเอทานอลามีน ดังแสดงในสมการที่ 2.14 ถึงสมการที่ 2.24





สมการที่ 2.14 ถึงสมการที่ 2.18 เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายโมโนเอทานอลามีน สมการที่ 2.19 ถึง สมการที่ 2.22 แสดงถึงการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน 1018 และสมการที่ 2.23 ถึงสมการที่ 2.24 บ่งบอกถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อน

ความเข้มข้นของสารละลายโมโนเอทานอลามีนส่งผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน 1018 โดยความเข้มข้นของสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่เพิ่มจาก 5.0 เป็น 7.0 และ 9.0 kmol/m³ ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นจาก 0.55 เป็น 0.72 และ 1.06 mmpy ตามลำดับ อัตราการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเพิ่มของไบคาร์บอเนตไอออน (HCO₃⁻) ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน และการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน 1018 ในสภาวะที่มีแก๊สออกซิเจน จะมีความหนาแน่นกระแสของชั้นฟิล์มพาสซีฟหรืออัตราการกัดกร่อน (passivation current densities) ที่น้อยกว่ากรณีที่ไม่มีแก๊สออกซิเจน เนื่องจากเกิดชั้นฟิล์มเฮมาไทต์ (γ-Fe₂O₃) ที่มีความแข็งแรงบนพื้นผิวโลหะ

Baah [17] ศึกษาการกัดกร่อนของทองแดงในสารละลายกรดโพรไฟโพนิกภายใต้สภาวะอากาศและความอึดตัวของออกซิเจนบริสุทธิ์ ที่มีความเข้มข้นของกรดโพรไฟโพนิก 10% และ 15% ที่อุณหภูมิ 30°C พบว่า การกัดกร่อนของทองแดงในสารละลายกรดโพรไฟโพนิกภายใต้สภาวะอากาศที่ความเข้มข้นของกรดโพรไฟโพนิก 10% มีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าที่ความเข้มข้นของกรดโพรไฟโพนิก 15% เนื่องจากมีการสร้างชั้นฟิล์มที่เร่งการกัดกร่อนหรือมีการกำจัดผิวที่ต้านทานการกัดกร่อนของทองแดง ขณะที่การกัดกร่อนของทองแดงในสารละลายกรดโพรไฟโพนิกภายใต้สภาวะความอึดตัวของออกซิเจน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดโพรไฟโพนิกจะมีอัตราการกัดกร่อนลดลง เนื่องจากมีการสร้างชั้นฟิล์มที่เป็นชั้นยับยั้งการกัดกร่อน

วิชาและคณะ [18] ทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายกรดแอสติคที่มีความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน และทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในสารละลายกรดแอสติคที่มีความเข้มข้น 5% และ 20% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน ด้วยวิธีการทดสอบแบบจุ่ม โดยวัดอัตราการกัดกร่อนด้วยการชั่งน้ำหนักและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของสารยับยั้งการกัดกร่อน A (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 60-100% โดยน้ำหนัก) และสารยับยั้งการกัดกร่อน B (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 30-60% โดยน้ำหนัก) พบว่า เหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายกรดแอสติคเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น ส่วนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลาย

ครั้งหนึ่ง และอยู่ในไอสารละลายเกิดการกัดกร่อนลดลงตามลำดับ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.11 และตารางที่ 2.12

กรณีการทดลองเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในสารละลายกรดแอสติกที่มีความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร ไม่พบการกัดกร่อนในทุกสภาวะการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2.13 ขณะที่สารละลายกรดแอสติกที่มีความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L จะเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงในสภาวะที่อยู่ในไอสารละลาย ส่วนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น และจุ่มอยู่ในสารละลายครั้งหนึ่งเกิดการกัดกร่อนลดลงตามลำดับ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.14 และตารางที่ 2.15

จากการทดลองประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด A และ B พบว่า สารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด A และ B สามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้ โดยสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด A มีประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนสูงกว่าชนิด B

ตารางที่ 2.11 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในกรดแอสติกที่มีความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน ในกรณีที่ไม่มีการกัดกร่อนและมีสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด A ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร [18]

อัตราส่วนสารละลายต่อสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด A	น้ำหนักที่หายไป (g)	อัตราการกัดกร่อน (mm/yr)	ประสิทธิภาพสารยับยั้งการกัดกร่อน (%)	
0	Vaporize	0.9914	19.048	0.00
	Half-immersion	12.2012	234.428	0.00
	Fully-immersion	13.6090	261.477	0.00
100:1	Vaporize	0.8804	16.916	11.20
	Half-immersion	9.4582	181.726	22.48
	Fully-immersion	11.0115	211.570	19.09
100:5	Vaporize	0.0957	1.839	90.35
	Half-immersion	0.5841	11.223	95.21
	Fully-immersion	0.7302	14.030	94.63

ตารางที่ 2.12 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน ในกรดแอสติกที่มีความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน ในกรณีที่ไม่มีสารยับยั้งการกัดกร่อนและมีสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด B ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร [18]

อัตราส่วนสารละลายต่อสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด B		น้ำหนักที่หายไป (g)	อัตราการกัดกร่อน (mm/yr)	ประสิทธิภาพสารยับยั้งการกัดกร่อน (%)
0	Vaporize	0.9914	19.048	0.00
	Half-immersion	12.2012	234.428	0.00
	Fully-immersion	13.6090	261.477	0.00
100:1	Vaporize	0.9146	17.573	7.75
	Half-immersion	10.4937	201.621	13.99
	Fully-immersion	11.6142	223.150	14.66
100:5	Vaporize	0.5083	9.766	48.73
	Half-immersion	5.2527	100.923	56.95
	Fully-immersion	6.6113	127.027	51.42

ตารางที่ 2.13 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในกรดแอสติกที่มีความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน ในกรณีที่ไม่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน [18]

อัตราส่วนสารละลายต่อสารยับยั้งการกัดกร่อน		น้ำหนักที่หายไป (g)	อัตราการกัดกร่อน (mm/yr)	ประสิทธิภาพสารยับยั้งการกัดกร่อน (%)
0	Vaporize	0.0000	0.000	0.00
	Half-immersion	0.0000	0.000	0.00
	Fully-immersion	0.0000	0.000	0.00

ตารางที่ 2.14 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในกรดแอสซิติคที่มีความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน ในกรณีที่ไม่มีการยับยั้งการกัดกร่อนและมีสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด A ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร [18]

อัตราส่วนสารละลายต่อสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด A		น้ำหนักที่หายไป (g)	อัตราการกัดกร่อน (mm/yr)	ประสิทธิภาพสารยับยั้งการกัดกร่อน (%)
0	Vaporize	0.0014	0.027	0.00
	Half-immersion	0.0006	0.011	0.00
	Fully-immersion	0.0009	0.017	0.00
100:1	Vaporize	0.0005	0.010	64.29
	Half-immersion	0.0005	0.010	16.67
	Fully-immersion	0.0004	0.008	55.56
100:5	Vaporize	0.0000	0.000	100.00
	Half-immersion	0.0001	0.002	83.33
	Fully-immersion	0.0000	0.000	100.00

ตารางที่ 2.15 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในกรดแอสซิติคที่มีความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน ในกรณีที่ไม่มีการยับยั้งการกัดกร่อนและมีสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด B ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร [18]

อัตราส่วนสารละลายต่อสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิด B		น้ำหนักที่หายไป (g)	อัตราการกัดกร่อน (mm/yr)	ประสิทธิภาพสารยับยั้งการกัดกร่อน (%)
0	Vaporize	0.0014	0.027	0.00
	Half-immersion	0.0006	0.011	0.00
	Fully-immersion	0.0009	0.017	0.00
100:1	Vaporize	0.0007	0.013	50.00
	Half-immersion	0.0006	0.011	0.00
	Fully-immersion	0.0007	0.013	22.22
100:5	Vaporize	0.0000	0.000	100.00
	Half-immersion	0.0003	0.006	50.00
	Fully-immersion	0.0002	0.004	77.78

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าสารประกอบที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนจัดเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน กรณีที่มีความยาวสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการละลายของสารยับยั้งการกัดกร่อนและความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลลดลงแต่ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อมีองค์ประกอบของอะมิโน แต่การดูดซับลดลงเมื่อมีการสร้างพันธะไฮโดรเจน เช่น สารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อะมิโน ได้แก่ โมโนเอทานอลามีน [19]

งานวิจัยของวิชาและคณะเป็นงานวิจัยที่บริษัทระยองวิศวกรรมและซ่อมบำรุง จำกัด มีความสนใจ ซึ่งได้ศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในกรดแอสติกและเปรียบเทียบประสิทธิภาพสารยับยั้งการกัดกร่อนที่มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน ในสถานะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง และอยู่ในไอสารละลาย งานวิจัยของวิชาและคณะยังขาดการทดลองการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในกรดโพไฟโพนิก เนื่องจากบริษัทฯ ตรวจพบกรดแอสติกเจือปน 60 ppm และกรดโพไฟโพนิกเจือปน 10 ppm บริษัทฯ อยากทราบว่ากรดโพไฟโพนิกเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L หรือไม่ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อสารเคมี	สูตรโมเลกุล	เกรด	ความเข้มข้น (%)
กรดโพไฟโอนิก	C ₂ H ₅ COOH	LR	99.5
กรดไฮโดรคลอริก	HCl	AR	37.0
สแตนนัสคลอไรด์	SnCl ₂	AR	-
แอนติโมนีไตรออกไซด์	Sb ₂ O ₃	AR	-
กรดไนตริก	HNO ₃	AR	69.0
น้ำกลั่น	H ₂ O	-	-
แอสีโทน	C ₃ H ₆ O	AR	99.5
สารยับยั้งการกัดกร่อน A (มีส่วนผสมของ โมโนเอทานอลามีน)	NH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	-	60.0-100.0
สารยับยั้งการกัดกร่อน B (มีส่วนผสมของ โมโนเอทานอลามีน)	NH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	-	30.0-60.0
สารดูดความชื้น	-	-	-

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- | | |
|---|---|
| 1. เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด A283 | 11. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 4 ตำแหน่ง |
| 2. เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L | 12. เครื่องล้างอัลตราโซนิก |
| 3. กระดาษทรายเบอร์ 80, 320, 600 | 13. เต้าให้ความร้อน |
| 4. เครื่องตัดชิ้นงาน | 14. เทอร์โมมิเตอร์ |
| 5. เครื่องเจาะรูชิ้นงาน | 15. คอนเดนเซอร์ |
| 6. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 2000 ml | 16. แท่งแก้วสำหรับใส่ชิ้นงาน |
| 7. ปีกเกอร์ ขนาด 50, 250, 1000, 2000 ml | 17. จุกยางซิลิโคน |
| 8. กระบอกตวงสาร ขนาด 10 ml | 18. สายยางซิลิโคน |
| 9. ที่คีบชิ้นงาน | 19. กระดาษทิชชู |
| 10. ไตรเป่าผม | |

3.1.3 องค์ประกอบของเหล็กกล้า

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของเหล็กกล้าคาร์บอน A283

ธาตุ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
ปริมาณ (wt.%)	0.056	0.027	0.274	0.020	0.013	0.033	0.003	0.017
ธาตุ	Al	Cu	Ti	V	Sn			
ปริมาณ (wt.%)	0.032	0.024	0.001	0.001	0.001			

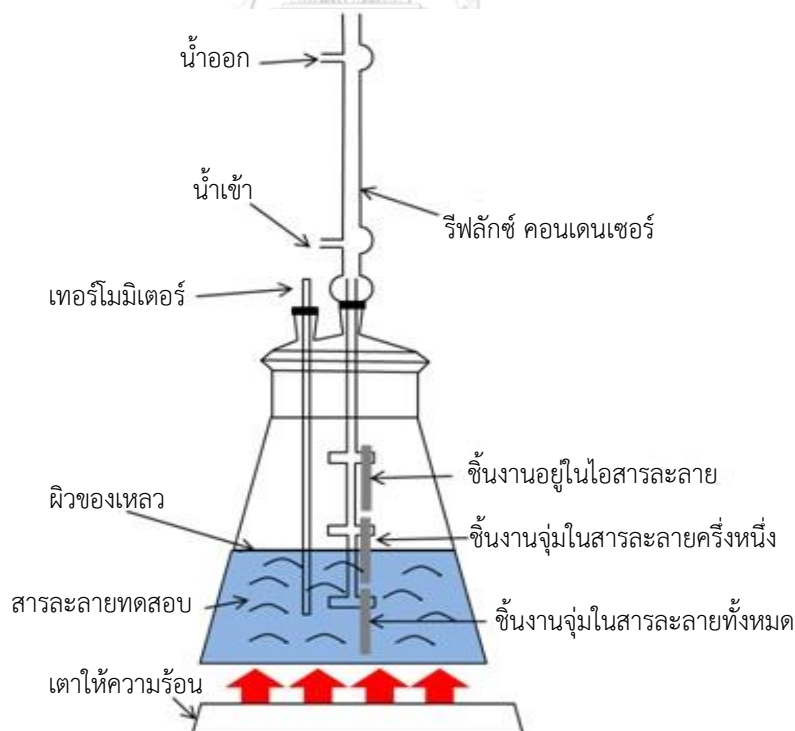
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L

ธาตุ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
ปริมาณ (wt.%)	0.015	0.580	1.630	0.031	0.001	18.330	8.030

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 เตรียมเหล็กกล้าคาร์บอน A283 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ให้มีขนาด 20 x 50 x 3 mm ตามมาตรฐาน ASTM G4 [5] และมาตรฐาน NACE TM0169-2000 [20] จากนั้นนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 600 ล้างด้วยเอซีโตนในเครื่องล้างอัลตราโซนิก เป่าให้แห้งและเก็บไว้ในภาชนะสารดูดความชื้นเป็นเวลา 1 วัน

3.2.2 ประกอบเครื่องมือทดสอบการกัดกร่อนแบบจุ่ม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องมือทดสอบการกัดกร่อนแบบจุ่ม [18]

3.2.3 ทดลองการกัดกร่อนของเหล็กกล้า

3.2.3.1 ทดลองการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีความเข้มข้นของสารละลายโมโนเอทานอลามีน ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) ในอัตราส่วน 30%, 45%, 60%, 75% และ 90% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

3.2.3.2 ทดลองการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่น น้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 30-60% โดยน้ำหนัก) และน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 60-100% โดยน้ำหนัก) โดยอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อสารยับยั้งการกัดกร่อนเป็น 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

3.2.3.3 ทดลองการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีความเข้มข้นของกรดโพโรไฟอิก 5% โดยปริมาตร ในกรณีที่ไม่มีสารยับยั้งการกัดกร่อนและกรณีที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน ซึ่งสารยับยั้งการกัดกร่อนแบ่งออกเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน B และสารยับยั้งการกัดกร่อน A โดยอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อสารยับยั้งการกัดกร่อนเป็น 100:1 และ 100:5 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

3.2.3.4 ทดลองการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในน้ำกลั่นที่มีความเข้มข้นของกรดโพโรไฟอิก 20% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน

3.2.4 ทดสอบการกัดกร่อนในสภาพการกัดกร่อนแบบจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง และอยู่ในไอสารละลาย

3.2.5 ล้างเหล็กกล้าคาร์บอน A283 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L

3.2.5.1 หลังจากทดสอบการกัดกร่อน ล้างเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1000 ml ผสมกับผงสแตนนัสคลอไรด์ (SnCl_2) 50 g และผงแอนติโมนีไตรออกไซด์ (Sb_2O_3) 20 g ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1-25 นาที ตามมาตรฐาน ASTM G1 [4] ล้างด้วยแอสซิโตนในเครื่องล้างอัลตราโซนิก จากนั้นเป่าให้แห้งและเก็บไว้ในภาชนะสารดูดความชื้นเป็นเวลา 1 วัน

3.2.5.2 หลังจากทดสอบการกัดกร่อน ล้างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ด้วยสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) 100 ml และน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1000 ml ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 20 นาที ตามมาตรฐาน ASTM G1 [4] ล้างด้วยแอสซิโตนในเครื่องล้างอัลตราโซนิก จากนั้นเป่าให้แห้งและเก็บไว้ในภาชนะสารดูดความชื้นเป็นเวลา 1 วัน

3.2.6 วัดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในแต่ละสภาวะการทดลอง โดยวิธีการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 4 ตำแหน่ง จากนั้นคำนวณอัตราการกัดกร่อน และประสิทธิภาพสารยับยั้งการกัดกร่อน

3.2.7 วิเคราะห์สภาพผิวเหล็กกล้าคาร์บอน A283 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ที่ถูกการกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

3.2.8 วิเคราะห์ออกไซด์ของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ที่ถูกการกัดกร่อนด้วย X-ray diffraction (XRD)

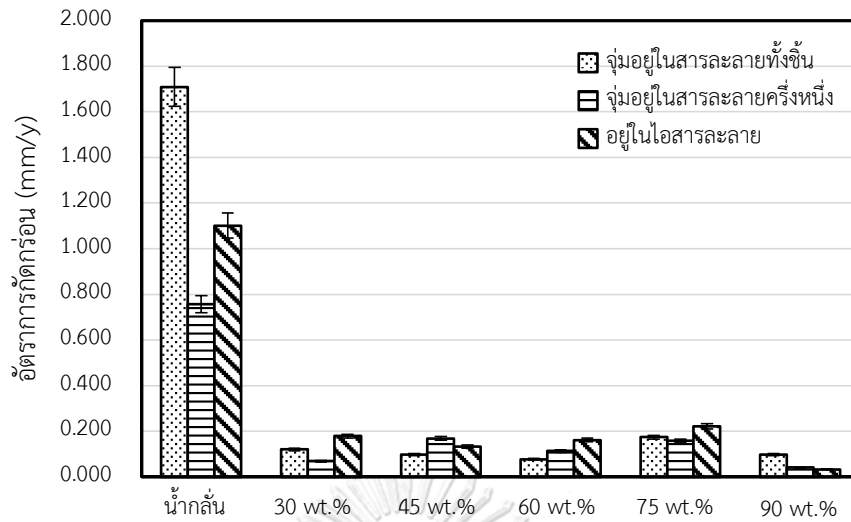


บทที่ 4

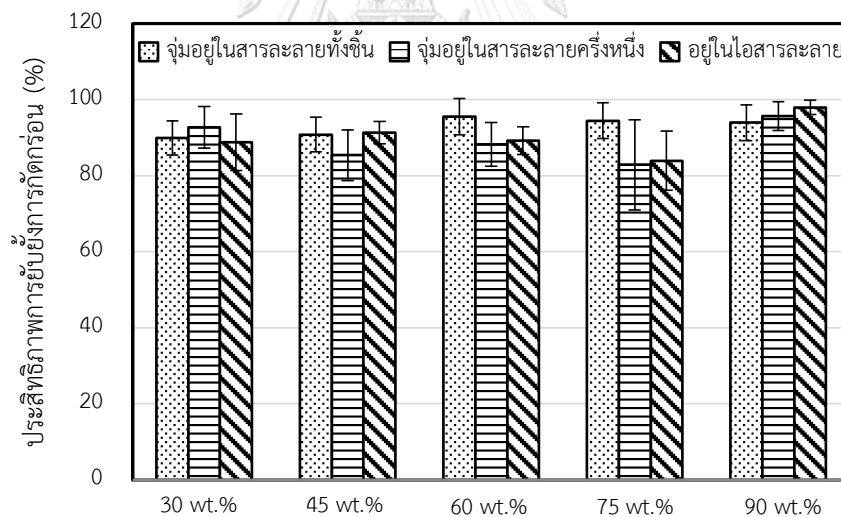
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน

ผลการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง และในไอสารละลาย ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า การเติมสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่มีความเข้มข้น 30%, 45%, 60%, 75% และ 90% โดยน้ำหนัก ลงไปในน้ำกลั่น ทำให้อัตราการกัดกร่อนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้นมีค่าลดลงจาก 1.71 mm/y เป็น 0.12, 0.10, 0.08, 0.17 และ 0.10 mm/y ตามลำดับ ส่วนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่งมีอัตราการกัดกร่อนลดลงจาก 0.76 mm/y เป็น 0.07, 0.17, 0.11, 0.16 และ 0.04 mm/y ตามลำดับ และในสภาวะไอสารละลายอัตราการกัดกร่อนลดลงจาก 1.10 เป็น 0.18, 0.13, 0.16, 0.22 และ 0.03 mm/y ตามลำดับ อัตราการกัดกร่อนที่ลดลงอาจเกิดจากความเป็นเบสของสารละลายโมโนเอทานอลามีน ซึ่งค่า pH ก่อนการทดลองของสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 10 ส่วนที่ความเข้มข้น 45%, 60%, 75% และ 90% โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 11 หลังจากทดสอบการกัดกร่อนพบว่าในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น มีค่า pH เท่ากับ 11 และในสภาวะไอสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 10 ซึ่งยังคงสภาวะความเป็นเบสของสารละลายโมโนเอทานอลามีน หรือเกิดจากสารละลายโมโนเอทานอลามีนดูดซับอยู่บนพื้นผิวโลหะ และสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์ขึ้น [21, 22]



รูปที่ 4.1 อัตราการกักต่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทาโนลามีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

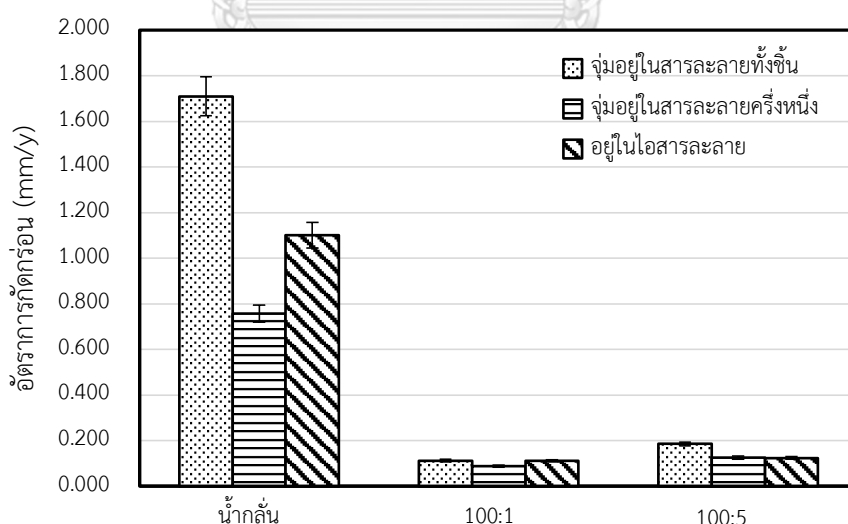


รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกักต่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทาโนลามีน ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

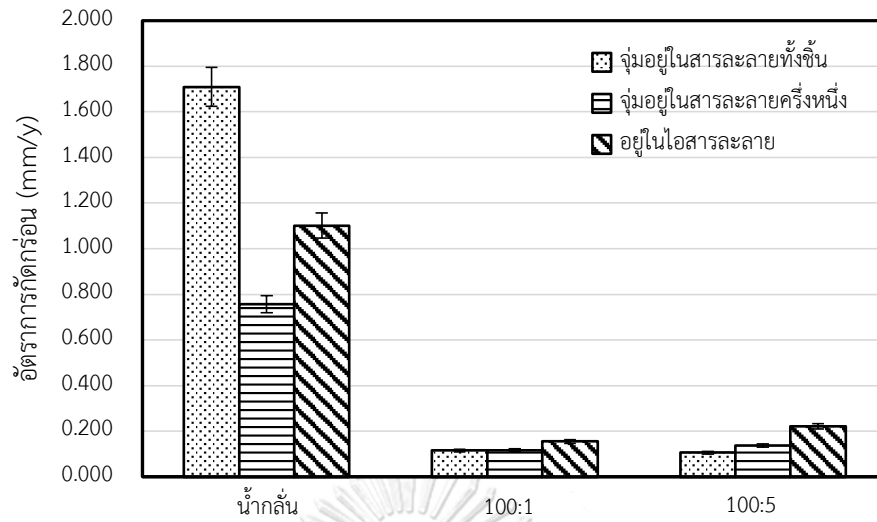
ประสิทธิภาพการยับยั้งการกักต่อนของสารละลายโมโนเอทาโนลามีนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครั้งหนึ่ง และในไอสารละลาย มีประสิทธิภาพในการยับยั้งสูงถึง 92%, 89% และ 90% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงว่าสารละลายโมโนเอทาโนลามีนสามารถช่วยยับยั้งการกักต่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ได้

4.2 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B และ A

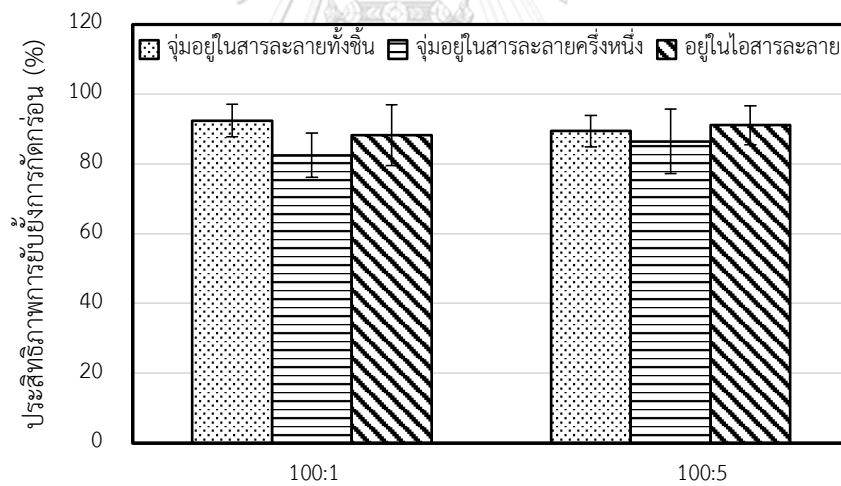
เมื่อเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 30-60% โดยน้ำหนัก) และสารยับยั้งการกัดกร่อน A (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 60-100% โดยน้ำหนัก) พบว่า การเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในน้ำกลั่น ที่มีอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 อัตราการกัดกร่อนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชั้นมีค่าลดลงจาก 1.71 mm/y เป็น 0.11 และ 0.19 mm/y ตามลำดับ ส่วนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่งอัตราการกัดกร่อนลดลงจาก 0.76 mm/y เป็น 0.09 และ 0.13 mm/y ตามลำดับ และในสภาวะไอสารละลายอัตราการกัดกร่อนลดลงจาก 1.10 mm/y เป็น 0.11 และ 0.12 mm/y ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ขณะที่รูปที่ 4.4 การเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในน้ำกลั่น ที่มีอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 พบว่า อัตราการกัดกร่อนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชั้นมีค่าลดลงจาก 1.71 mm/y เป็น 0.12 และ 0.11 mm/y ตามลำดับ ส่วนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่งอัตราการกัดกร่อนลดลงจาก 0.76 mm/y เป็น 0.12 และ 0.14 mm/y ตามลำดับ และในสภาวะไอสารละลายอัตราการกัดกร่อนลดลงจาก 1.10 mm/y เป็น 0.16 และ 0.22 mm/y ตามลำดับ ซึ่งอัตราการกัดกร่อนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชั้นจุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง และในไอสารละลายที่มีอัตราส่วนของน้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 มีอัตราการกัดกร่อนใกล้เคียงกัน



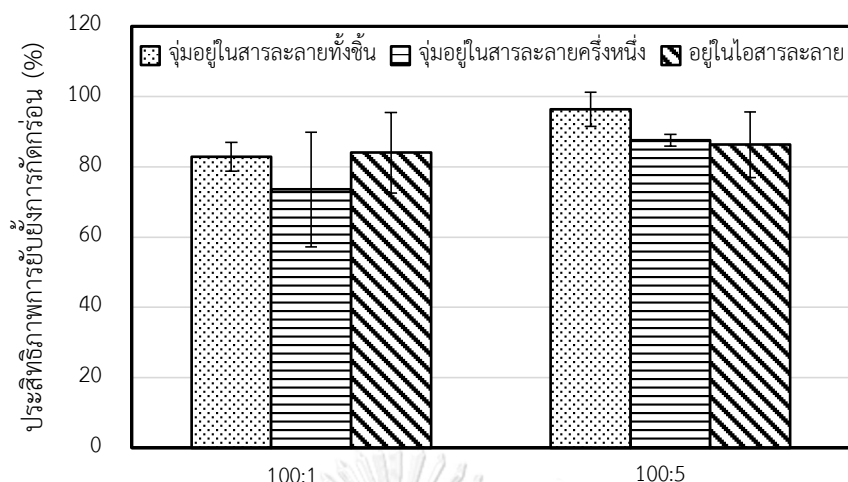
รูปที่ 4.3 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน



รูปที่ 4.4 อัตราการกักตรอนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกักตรอน A ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกักตรอนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกักตรอน B ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

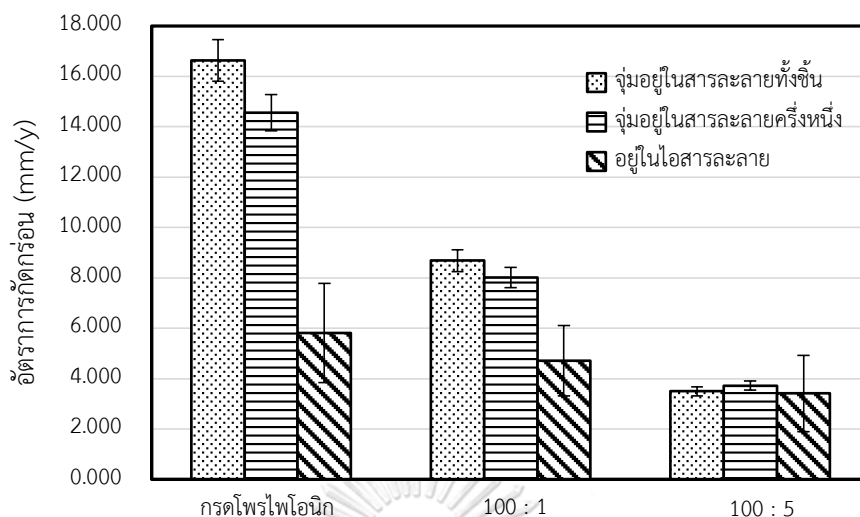


รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

จากรูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของสารยับยั้งการกัดกร่อน B มีประสิทธิภาพในการยับยั้งสูงถึง 80% ส่วนประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนของสารยับยั้งการกัดกร่อน A มีประสิทธิภาพในการยับยั้งประมาณ 80% เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แสดงว่าสารยับยั้งการกัดกร่อน B และ A สามารถชะลอการเกิดการกัดกร่อนได้

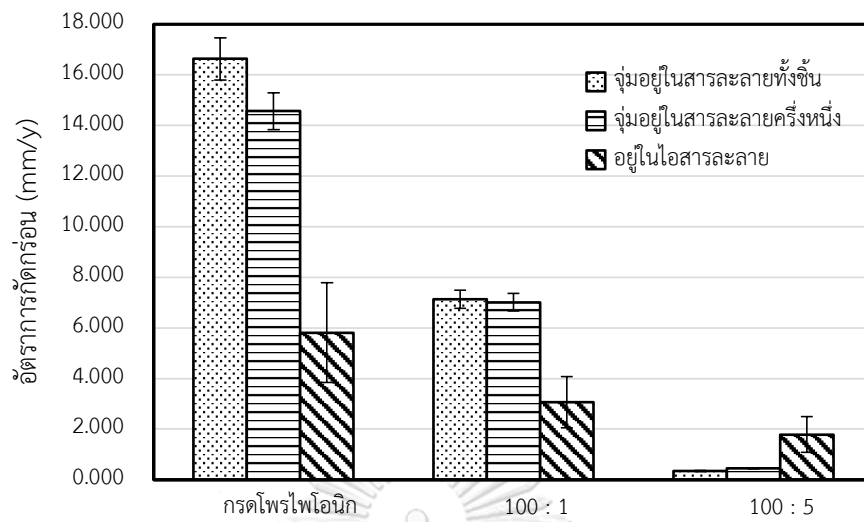
4.3 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟไอติกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B และ A

อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟไอติก พบว่าอัตราการกัดกร่อนมีความรุนแรงที่สุดในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น รองลงมาคือในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง และถัดมาคือในสภาวะไอสารละลาย เมื่อเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าอัตราการกัดกร่อนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้นมีค่าลดลงจาก 16.63 mm/y เป็น 8.69 และ 3.50 mm/y ตามลำดับ ส่วนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่งอัตราการกัดกร่อนมีค่าลดลงจาก 14.56 mm/y เป็น 8.01 และ 3.73 mm/y ตามลำดับ และในสภาวะไอสารละลายอัตราการกัดกร่อนลดลงจาก 5.81 mm/y เป็น 4.71 และ 3.42 mm/y ตามลำดับ การเพิ่มอัตราส่วนของสารยับยั้งการกัดกร่อน B ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนมีค่าลดลง

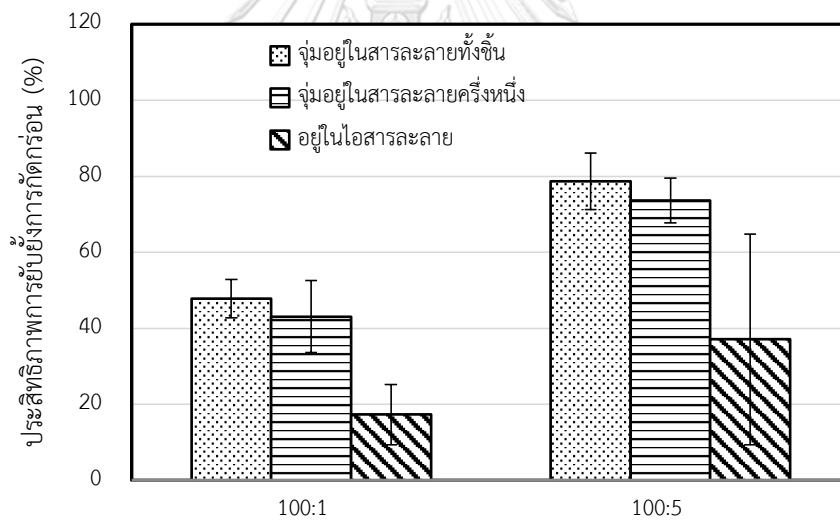


รูปที่ 4.7 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพสฟอริกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

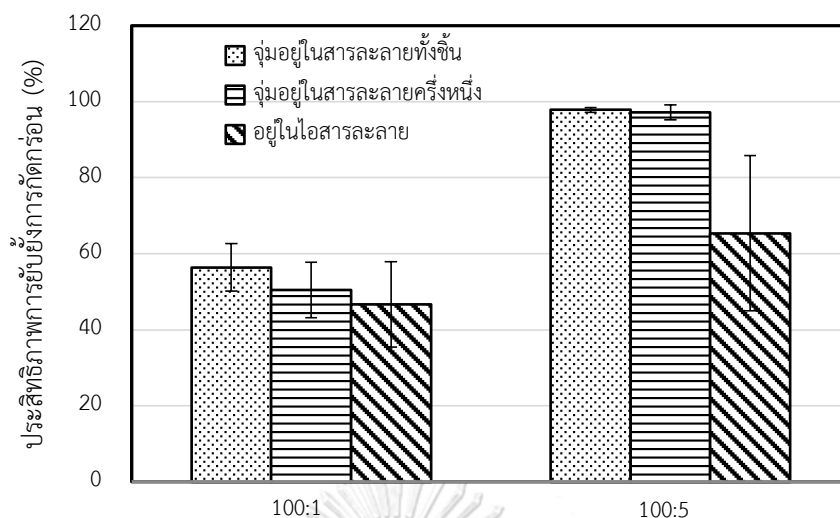
ขณะที่การเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 อัตราการกัดกร่อนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้นมีค่าลดลงจาก 16.63 mm/y เป็น 7.14 และ 0.35 mm/y ตามลำดับ ส่วนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่งอัตราการกัดกร่อนมีค่าลดลงจาก 14.56 mm/y เป็น 7.01 และ 0.45 mm/y ตามลำดับ และในสภาวะไอสารละลายอัตราการกัดกร่อนลดลงจาก 5.81 mm/y เป็น 3.07 และ 1.79 mm/y ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 การเพิ่มอัตราส่วนของสารยับยั้งการกัดกร่อน A อัตราการกัดกร่อนมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด อาจเกิดจากการเปลี่ยนค่า pH ของสารละลาย ซึ่งค่า pH ก่อนการทดลองของสารละลายกรดโพสฟอริก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วน 100:1 มีค่าเท่ากับ 5 ส่วนหลังการทดลองในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้นมีค่า pH เท่ากับ 5 และในสภาวะไอสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 3 ขณะที่ค่า pH ก่อนการทดลองของสารละลายกรดโพสฟอริก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วน 100:5 มีค่าเท่ากับ 4 ส่วนหลังการทดลองในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้นมีค่า pH เท่ากับ 10 และในสภาวะไอสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 9 ซึ่งอาจจะแสดงถึงปริมาณของสารยับยั้งการกัดกร่อนที่มีปริมาณเพียงพอต่อการยับยั้งการกัดกร่อน



รูปที่ 4.8 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโตนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

จากรูปที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชั้น จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง และในไอสารละลายของสารยับยั้งการกัดกร่อน B พบว่าในอัตราส่วน 100:1 มีประสิทธิภาพในการยับยั้ง 47%, 43% และ 17% ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 100:5 มีประสิทธิภาพในการยับยั้ง 78%, 73% และ 37% ตามลำดับ ขณะที่สารยับยั้งการกัดกร่อน A ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าอัตราส่วน 100:1 มีประสิทธิภาพในการยับยั้ง 56%, 50% และ 46% ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 100:5 มีประสิทธิภาพในการยับยั้งสูงถึง 97%, 97% และ 65% ตามลำดับ แสดงว่าสารยับยั้งการกัดกร่อน A มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนที่ดีกว่าสารยับยั้งการกัดกร่อน B และในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชั้นประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอาจเกิดจากสารยับยั้งการกัดกร่อนดูดซับอยู่บนพื้นผิวโลหะและสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์ขึ้น ส่วนในสภาวะไอสารละลายอาจเกิดจากสารยับยั้งการกัดกร่อนทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดโพรไฟโตนิก

4.4 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ใน 20% สารละลายกรดโพรไฟโอนิก

ตารางที่ 4.1 อัตราการกัดกร่อนและประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ใน 20% สารละลายกรดโพรไฟโอนิก ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน

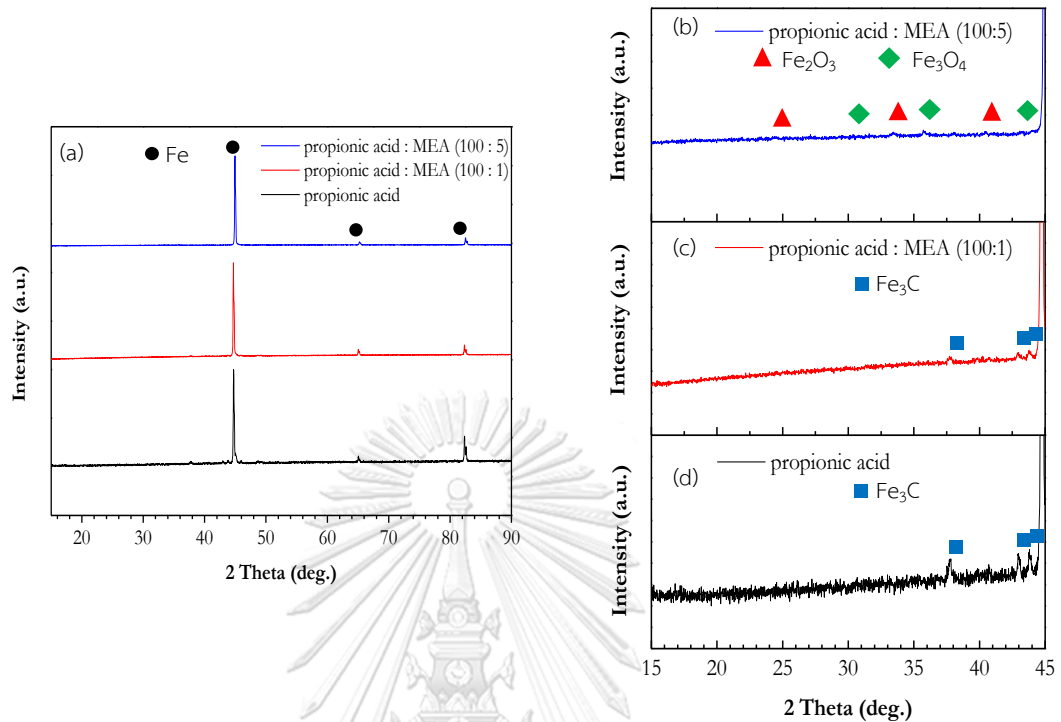
ชิ้นงาน	อัตราการกัดกร่อน (mm/y)	ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (%)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	0.00	0
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	0.00	0
อยู่ในไอสารละลาย 1	0.00	0

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ใน 20% สารละลายกรดโพรไฟโอนิก ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน สามารถทนทานต่อการเกิดการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมนี้ได้

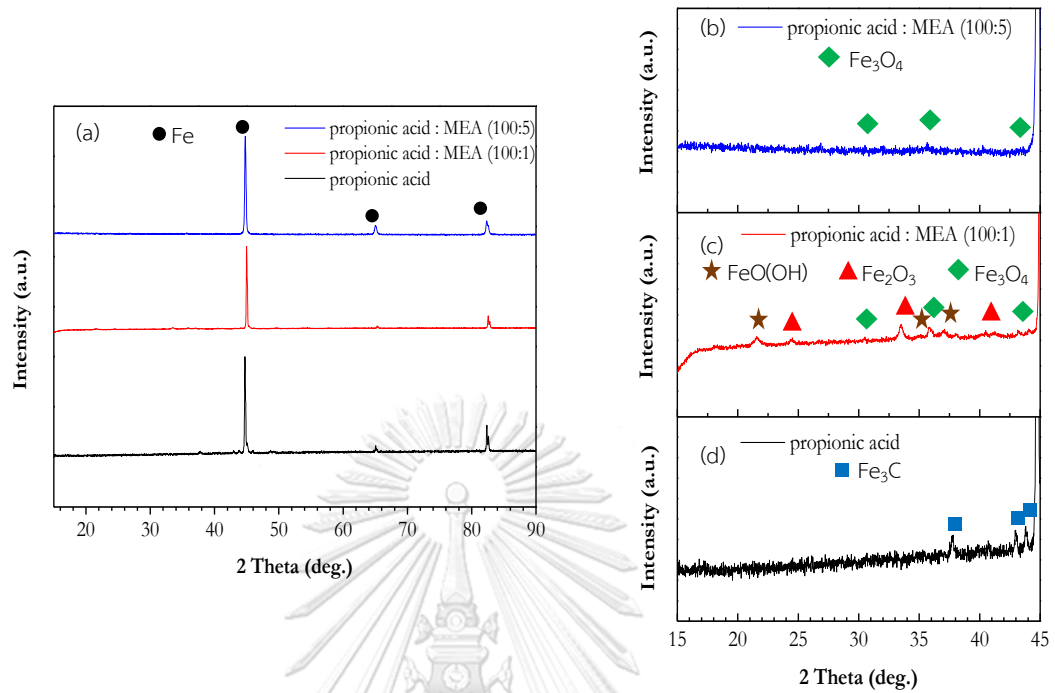
4.5 ออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังจากทดสอบการกัดกร่อน

หลังจากทดสอบการกัดกร่อนแล้วได้นำชิ้นงานที่ถูกการกัดกร่อนไปวิเคราะห์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน พบว่า เหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิก และ 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วน 100:1 ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น พบซีเมนไทต์ (Fe_3C) (ICDD 00-034-0001) อยู่บนพื้นผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (c-d) อาจเกิดจากในสภาวะเหล่านี้มีความดันย่อย (partial pressure) ของออกซิเจนที่น้อยที่ไม่สามารถเกิดแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ได้ [23] แต่ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วน 100:5 เกิด Fe_3O_4 (ICDD 01-071-6336) และเฮมาไทต์ (Fe_2O_3) (ICDD 01-076-4579) บนพื้นผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (b) คาดว่าในอัตราส่วน 100:5 มีความดันย่อยของออกซิเจนที่มาจากสารยับยั้งการกัดกร่อนที่มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีนที่เพียงพอต่อการเกิดชั้นออกไซด์



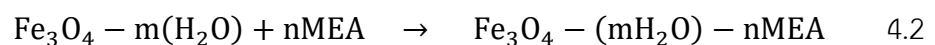
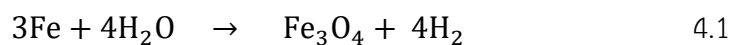
รูปที่ 4.11 XRD patterns ของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไพโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วนที่ต่างกันในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

ขณะที่ 5% สารละลายกรดโพรไพโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วน 100:1 ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น พบแก๊ส FeO(OH) (ICDD 01-081-0462), Fe₃O₄ และ Fe₂O₃ อยู่บนพื้นผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (c) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารยับยั้งการกัดกร่อนเป็น 100:5 ไม่ปรากฏออกไซด์ของ FeO(OH) และ Fe₂O₃ บนพื้นผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (b) ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้คาดว่าจะช่วยลดการกัดกร่อนของชิ้นงานให้น้อยลง

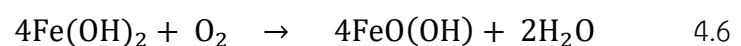


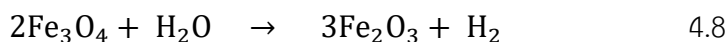
รูปที่ 4.12 XRD patterns ของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไพโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

กลไกการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ด้วยสารละลายโมโนเอทานอลามีน คาดว่าเกิดจาก 2 กลไก คือ การดูดซับสารละลายโมโนเอทานอลามีน [21, 22] และการเกิดชั้นออกไซด์บนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน A283



จากปฏิกิริยาที่ 4.1 และ 4.2 คาดว่าสารละลายโมโนเอทานอลามีนดูดซับอยู่บนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน A283 เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้า

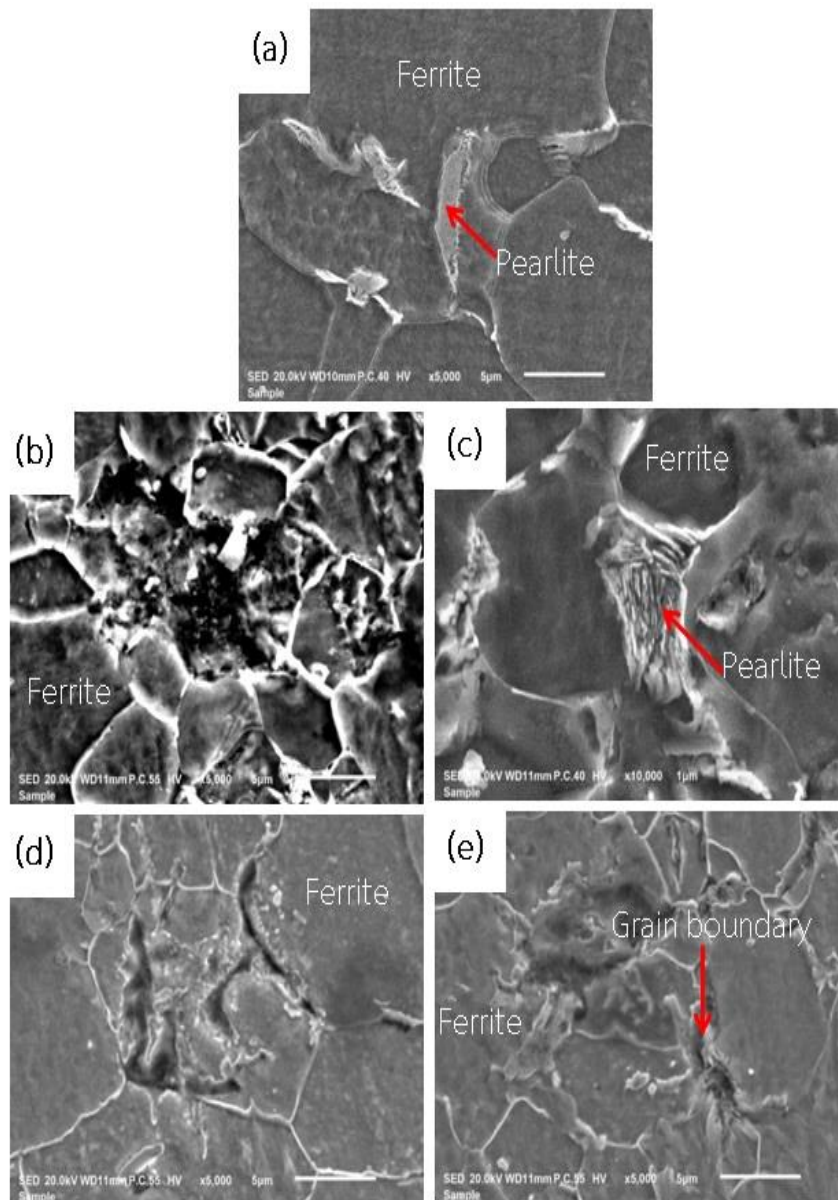




ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นออกไซด์ดังแสดงในสมการที่ 4.3 ถึงสมการที่ 4.8 โดยที่สมการที่ 4.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Fe เมื่อโมโนเอทานอลามีนทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 4.4 [24] ซึ่งโมโนเอทานอลามีนลดการเกิดออกซิเดชันของ Fe โดยเกิด Fe(OH)₂ ตามปฏิกิริยาที่ 4.5 การเกิดขึ้นออกไซด์ของ FeO(OH) ถูกแสดงในปฏิกิริยาที่ 4.6 [25] ออกไซด์ของ FeO(OH) สามารถเปลี่ยนแปลงเป็น Fe₃O₄ ได้ดังปฏิกิริยาที่ 4.7 [26] เมื่อ Fe₃O₄ ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดเป็น Fe₂O₃ ขึ้นดังปฏิกิริยาที่ 4.8 [16]

4.6 โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นหลังจากทดสอบการกัดกร่อน

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ประกอบด้วยเฟอไรต์ (ferrite) และเพอร์ไลต์ (pearlite) ซึ่งเพอร์ไลต์อยู่บนขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (a) เมื่อนำเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ทดสอบใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทิ้งขึ้น พบว่า การกัดกร่อนเกิดขึ้นในเกรนซึ่งเป็นเฟอไรต์ ดังรูปที่ 4.13 (b) และขยายภาพให้มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.13 (c) พบว่าบริเวณเฟอไรต์มีลักษณะเป็นหลุมลึก เนื่องจากบริเวณนี้มีความอ่อนแอและเป็นแอโนด จึงทำให้บริเวณนี้ถูกการกัดกร่อนได้ง่าย ขณะที่ Fe₃C ที่อยู่ในเพอร์ไลต์มีความแข็งแรงและเป็นแคโทด จึงทำให้เพอร์ไลต์ถูกการกัดกร่อนได้ยากกว่า [27, 28] เมื่อเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วน 100:5 พบว่า ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทิ้งขึ้นการกัดกร่อนบริเวณเฟอไรต์มีปริมาณลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (d) อาจเกิดจากสารละลายโมโนเอทานอลามีนดูดซับอยู่บนพื้นผิวโลหะและสร้างชั้นออกไซด์ของ Fe₃O₄ และ Fe₂O₃ บนพื้นผิวชิ้นงานจึงทำให้การกัดกร่อนมีปริมาณที่ลดลง ส่วน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกในสภาวะไอสารละลาย พบว่าบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนมากที่สุด คือ บริเวณขอบเกรนระหว่างเฟอไรต์และเพอร์ไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (e)



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 (a), ชิ้นงานใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น (b,c), ชิ้นงานใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน B ในอัตราส่วน 100:5 ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น (d) และชิ้นงานใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกในสภาวะไอสารละลาย (e)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน พบว่า สารละลายโมโนเอทานอลามีนช่วยลดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง และในไอสารละลาย ซึ่งมีประสิทธิภาพในการยับยั้งสูงถึง 90%

การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีส่วนผสมของสารยับยั้งการกัดกร่อน B (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 30-60% โดยน้ำหนัก) และสารยับยั้งการกัดกร่อน A (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 60-100% โดยน้ำหนัก) ในอัตราส่วน 100:1 และ 100:5 พบว่า อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง และในไอสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าสารยับยั้งการกัดกร่อน B และสารยับยั้งการกัดกร่อน A สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการยับยั้งสูงถึง 80%

การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิก พบว่า ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้นมีอัตราการกัดกร่อนมากที่สุด รองลงมาคือสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง และถัดมาคือในสภาวะไอสารละลาย เมื่อมีการเติมส่วนผสมของสารยับยั้งการกัดกร่อน B (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 30-60% โดยน้ำหนัก) และสารยับยั้งการกัดกร่อน A (มีส่วนผสมของโมโนเอทานอลามีน 60-100% โดยน้ำหนัก) ในอัตราส่วน 100:1 พบว่า ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้นมีอัตราการกัดกร่อนที่ลดลงและมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน ขณะที่การเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วน 100:5 อัตราการกัดกร่อนในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้นมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าสารยับยั้งการกัดกร่อน A ในอัตราส่วน 100:5 มีประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกดีที่สุด

หลังจากทดสอบการกัดกร่อนพบการเกิดชั้นออกไซด์ของ FeO(OH) , Fe_3O_4 และ Fe_2O_3 บนพื้นผิวชิ้นงาน คาดว่าออกไซด์เหล่านี้ช่วยป้องกันการกัดกร่อน และบริเวณที่เกิดการกัดกร่อน คือ บริเวณเฟร์ไรต์ (ferrite) และบริเวณขอบเกรนระหว่างเฟร์ไรต์และเพอร์ไลต์ (pearlite)

บรรณานุกรม

- 1 Jones, D.A., *Principles and prevention of corrosion*. 1992, Macmillan. 5-34, 503-510.
- 2 Sastri, V.S., *Green corrosion inhibitors*. 2011, John Wiley & Sons, Inc. 1, 10-27, 105-115, 223-231.
- 3 สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ และคณะ., *วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน*. 2548, สำนักพิมพ์ท็อป. 524-542.
- 4 G1, A., *Standard practice for preparing, cleaning, and evaluation corrosion test specimens*. 1999: West Conshohocken. p. 15-21.
- 5 G4, A., *Standard guide for conducting corrosion coupon tests in field applications*. 1995: Philadelphia. p. 45-53.
- 6 Krisher, A.S., *Technical information regarding corrosion testing*. p. 1-2.
- 7 Palmer, J.W., W. Hedges, and J.L. Dawson, *The use of corrosion inhibitors in oil and gas production*. 2004, Maney. 9-12.
- 8 Schweitzer, P. A., *Corrosion of linings and coatings cathodic and inhibitor protection and corrosion monitoring*. 2007, Taylor and Francis Group. 55-65, 536-537.
- 9 G31, A., *Standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals*. 1999: West Conshohocken. p. 1-8.
- 10 Juan A. V. Trevino, S.N.d.l.G., Mexico, *Corrosion inhibitor for CO₂ absorption process using alkanolamines*. 1987, Hylsa, S.A., Monterrey, Mexico. p. 1-7.
- 11 Ljiljana v. Minevski, T.W., Tex., *Corrosion inhibitor for alkanolamine units*. 1999, BetzDearborn Inc., Trevose, Pa. p. 1-6.
- 12 Bruce T. Alexander, L., Ky., *Stabilization of aqueous amine solutions against oxidation and corrosion in gas separation processes*. 1951, The Girdler Corporation, Louisville, Ky., a corporation of Delaware. p. 1-5.
- 13 Robert M. Reed, L., Ky., *Stabilization of monoethanolamine solutions*. 1945, Girdler Corporation, Louisville, Ky., a corporation of Delaware. p. 1-2.
- 14 Bill R.Keeney; Joe W. Johnson, J., both of Duncan, Okla., *Inhibited treating acid*. 1973, Halliburton Company, Duncan, Okla. p. 1-10.

- 15 Zheng, L. , et al. , *CO₂ loading-dependent corrosion of carbon steel and formation of corrosion products in anoxic 30 wt. % monoethanolamine-based solutions*. Corrosion Science, 2016. 102: p. 44-54.
- 16 Soosairakasam, I.R. and A. Veawab, *Corrosion and polarization behavior of carbon steel in MEA-based CO₂ capture process*. International journal of greenhouse gas control, 2008. 2: p. 553-562.
- 17 Baah, C.A., *Behavior of copper in propionic acid*. Material & Design, 1996. 17: p. 251-253.
- 18 วิชา ช้ายั่น และ ศิวกร สุขสวัสดิ์, การทดสอบหาสารยับยั้งการกัดกร่อนที่เหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ในสารละลายกรดแอสติก. 2016, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. p. 1-42.
- 19 Raicheva, S.N., B.V. Aleksiev, and E.I. Sokolova, *The effect of the chemical structure of some nitrogen- and sulphur- containing organic compounds on their corrosion inhibiting action*. Corrosion Science, 1993. 34: p. 343-350.
- 20 TM0169-2000, N. S. , *Standard test method laboratory corrosion testing of metals*. 1995: Houston. p. 1-10.
- 21 Jevremovic, I. and V. Miskovic-Stankovic, *The inhibitive effect of ethanolamine on corrosion behavior of aluminium in NaCl solution saturated with CO₂*. Association of Metallurgical Engineers of Serbia, 2012. 18: p. 241-257.
- 22 Gouron, A. , et al. , *Density functional theory study of monoethanolamine adsorption on hydroxylated Cr₂O₃ surface*. The Journal of Physical Chemistry C, 2015: p. A-J.
- 23 KIM, D.-Y., Y.-U. HEO, and Y. SASAKI, *Cementite formation from magnetite under high pressure conditions*. ISIJ International, 2013. 53: p. 950-957.
- 24 Scheiman, M.A., *A review of monoethanolamine chemistry*. 1962: U.S. Naval research laboratory. p. 1-51.
- 25 De, A.K., *Environmental Chemistry*. 2003, New Age International (P) Ltd., . 155-157.
- 26 Mizutani, N. , et al. , *Effect of ferrous/ ferric ions molar ratio on reaction mechanism for hydrothermal synthesis of magnetite nanoparticles*. Indian Academy of Sciences, 2008. 31: p. 713-717.

- 27 Groysman, A., *Corrosion for Everybody*. 2010, Springer. 35-36.
- 28 Moore, J.J., *Chemical Metallurgy*. 1981, Butterworths. 297.



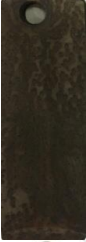


















ภาคผนวก



















จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก






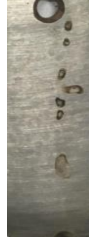












ตารางที่ ก.1 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น	จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง	อยู่ในไอสารละลาย
น้ำกลั่น			
น้ำกลั่น + 30 wt.% โมโนเอทานอลามีน			
น้ำกลั่น + 45 wt.% โมโนเอทานอลามีน			
น้ำกลั่น + 60 wt.% โมโนเอทานอลามีน			
น้ำกลั่น + 75 wt.% โมโนเอทานอลามีน			
น้ำกลั่น + 90 wt.% โมโนเอทานอลามีน			

ตารางที่ ก.2 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น	จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง	อยู่ในไอสารละลาย
น้ำกลั่น			
น้ำกลั่น + 30 wt.% โมโนเอทานอลามีน			
น้ำกลั่น + 45 wt.% โมโนเอทานอลามีน			
น้ำกลั่น + 60 wt.% โมโนเอทานอลามีน			
น้ำกลั่น + 75 wt.% โมโนเอทานอลามีน			
น้ำกลั่น + 90 wt.% โมโนเอทานอลามีน			




ตารางที่ ก.3 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น	จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง	อยู่ในไอสารละลาย
น้ำกลั่น			
น้ำกลั่น + 30 wt.% โมโนเอทานอลามีน			
น้ำกลั่น + 45 wt.% โมโนเอทานอลามีน			
น้ำกลั่น + 60 wt.% โมโนเอทานอลามีน			
น้ำกลั่น + 75 wt.% โมโนเอทานอลามีน			
น้ำกลั่น + 90 wt.% โมโนเอทานอลามีน			

ตารางที่ ก.4 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	น้ำกลั่น	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 1)	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 1)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			


ตารางที่ ก.5 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	น้ำกลั่น	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 1)	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 1)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			

ตารางที่ ก.6 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	น้ำกลั่น	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 1)	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 1)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			

ตารางที่ ก.7 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 4)

ชิ้นงาน	น้ำกลั่น	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 1)	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 1)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			

ตารางที่ ก.8 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	น้ำกลั่น	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 5)	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 5)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			










ตารางที่ ก.9 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	น้ำกลั่น	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 5)	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 5)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			

ตารางที่ ก.10 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	น้ำกลั่น	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 5)	น้ำกลั่น + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 5)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			

ตารางที่ ก.11 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 1)	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 1)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			








ตารางที่ ก.12 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 1)	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 1)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			

ตารางที่ ก.13 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 1)	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 1)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			


ตารางที่ ก.14 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 4)

ชิ้นงาน	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 1)	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 1)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			



ตารางที่ ก.15 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 5)	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 5)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			



ตารางที่ ก.16 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโพนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	สารละลายกรดโพรไฟโพนิก	สารละลายกรดโพรไฟโพนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 5)	สารละลายกรดโพรไฟโพนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 5)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			

ตารางที่ ก.17 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 5)	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 5)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			

ตารางที่ ก.18 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 4)

ชิ้นงาน	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100 : 5)	สารละลายกรดโพรไฟโอนิก + สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100 : 5)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น			
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง			
อยู่ในไอสารละลาย			

ตารางที่ ก.19 ชิ้นงานเหล็กไร้สนิม AISI 304L ใน 20% สารละลายกรดโพรไฟโอนิก ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน

ชิ้นงาน	จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น	จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง	อยู่ในไอสารละลาย
20% กรดโพรไฟโอนิก			

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	21.2387	20.9458
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	22.0766	22.0307
อย่างละครึ่งหนึ่ง 1		
อยู่ในไอสารละลาย 1	20.5612	20.4866
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	20.4076	20.4056
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	22.7633	22.7569
อย่างละครึ่งหนึ่ง 2		
อยู่ในไอสารละลาย 2	20.7567	20.7510
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	22.8613	22.8608
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	22.3974	22.3942
อย่างละครึ่งหนึ่ง 3		
อยู่ในไอสารละลาย 3	22.7938	22.7863
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 4	21.9774	21.9714
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	21.1929	21.1872
อย่างละครึ่งหนึ่ง 4		
อยู่ในไอสารละลาย 4	21.0668	21.0613
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 5	20.8375	20.8164
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	21.8767	21.8640
อย่างละครึ่งหนึ่ง 5		
อยู่ในไอสารละลาย 5	20.5073	20.4919
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 6	21.9621	21.9566
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	20.8617	20.8603
อย่างละครึ่งหนึ่ง 6		
อยู่ในไอสารละลาย 6	21.5057	21.5051

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น + 30 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 3 = น้ำกลั่น + 45 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 4 = น้ำกลั่น + 60 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 5 = น้ำกลั่น + 75 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 6 = น้ำกลั่น + 90 wt.% โมโนเอทานอลามีน

ตารางที่ ข.2 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	20.0490	19.9820
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	21.6468	21.5651
อยู่ในไอสารละลาย 1	20.6044	20.5134
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	20.5916	20.5849
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	21.2251	21.2229
อยู่ในไอสารละลาย 2	20.5747	20.5572
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	20.7134	20.7099
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	20.1309	20.1162
อยู่ในไอสารละลาย 3	20.2978	20.2876
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 4	20.8459	20.8441
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 4	20.9453	20.9411
อยู่ในไอสารละลาย 4	21.6229	21.6096
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 5	20.5603	20.5592
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 5	20.1186	20.1154
อยู่ในไอสารละลาย 5	21.8313	21.8246
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 6	22.2025	22.1970
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 6	20.1783	20.1773
อยู่ในไอสารละลาย 6	21.6865	21.6826

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น + 30 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 3 = น้ำกลั่น + 45 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 4 = น้ำกลั่น + 60 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 5 = น้ำกลั่น + 75 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 6 = น้ำกลั่น + 90 wt.% โมโนเอทานอลามีน

ตารางที่ ข.3 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	22.2818	22.2300
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	21.2921	21.2480
อยู่ในไอสารละลาย 1	21.8707	21.8123
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	22.6140	22.6038
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	22.1524	22.1499
อยู่ในไอสารละลาย 2	22.4821	22.4785
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	20.1323	20.1215
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	19.2775	19.2702
อยู่ในไอสารละลาย 3	19.2075	19.2047
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 4	21.4906	21.4863
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 4	21.0996	21.0923
อยู่ในไอสารละลาย 4	20.1828	20.1769
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 5	20.4907	20.4871
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 5	20.9507	20.9421
อยู่ในไอสารละลาย 5	22.4419	22.4298
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 6	21.0471	21.0429
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 6	21.3636	21.3599
อยู่ในไอสารละลาย 6	20.9666	20.9660

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น + 30 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 3 = น้ำกลั่น + 45 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 4 = น้ำกลั่น + 60 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 5 = น้ำกลั่น + 75 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 6 = น้ำกลั่น + 90 wt.% โมโนเอทานอลามีน

ตารางที่ ข.4 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	21.2387	20.9458
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	22.0766	22.0307
อยู่ในไอสารละลาย 1	20.5612	20.4866
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	21.6614	21.6531
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	20.9572	20.9518
อยู่ในไอสารละลาย 2	22.1974	22.1882
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	21.2975	21.2861
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	21.8135	21.8085
อยู่ในไอสารละลาย 3	21.1528	21.1484

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)



ตารางที่ ข.5 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

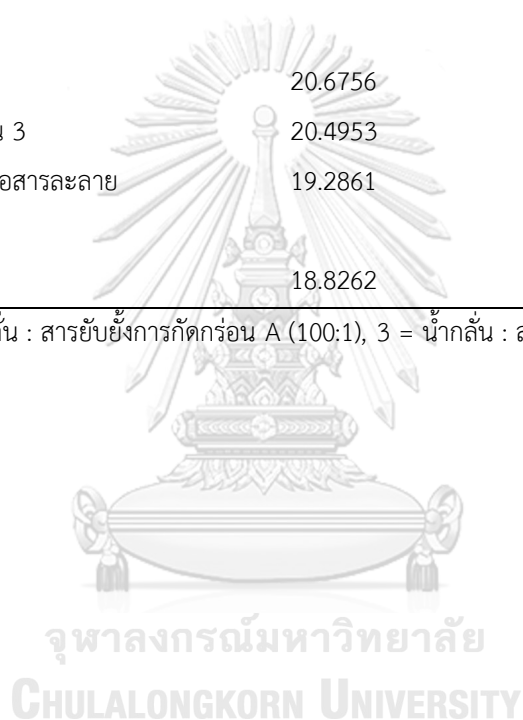
ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	22.2818	22.2300
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	19.2892	19.2782
อยู่ในไอสารละลาย 1	22.2072	22.1810
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	21.3470	21.3449
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	21.1024	21.0993
อยู่ในไอสารละลาย 2	21.2042	21.2037
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	21.4081	21.4047
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	20.9089	20.9070
อยู่ในไอสารละลาย 3	21.3667	21.3646

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ข.6 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	21.3448	21.3300
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	21.2921	21.2480
อยู่ในไอสารละลาย 1	21.8707	21.8123
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	20.7643	20.7562
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	21.7514	21.7433
อยู่ในไอสารละลาย 2	20.6756	20.6609
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	20.4953	20.4932
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	19.2861	19.2791
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.8262	18.8136

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)



ตารางที่ ข.7 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 4)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.0460	19.0349
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	20.9617	20.9467
อย่างละครึ่งหนึ่ง 1		
อยู่ในไอสารละลาย 1	21.4846	21.4530
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	21.6704	21.6650
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	19.9363	19.9291
อย่างละครึ่งหนึ่ง 2		
อยู่ในไอสารละลาย 2	19.8982	19.8913
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.0541	19.0481
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	19.3129	19.3090
อย่างละครึ่งหนึ่ง 3		
อยู่ในไอสารละลาย 3	20.2018	20.1992

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ข.8 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 5)

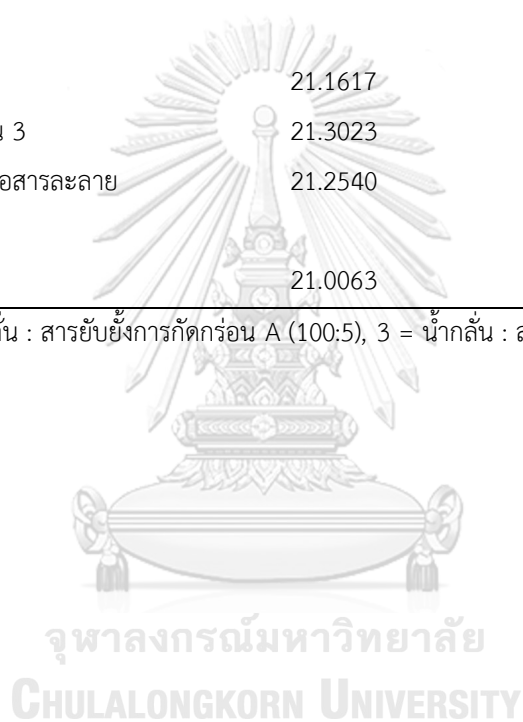
ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	20.0490	19.9820
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	21.6468	21.5651
อย่างละครึ่งหนึ่ง 1		
อยู่ในไอสารละลาย 1	20.6044	20.5134

*1 = น้ำกลั่น

ตารางที่ ข.9 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	21.2387	20.9458
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	22.0766	22.0307
อยู่ในไอสารละลาย 1	20.5612	20.4866
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	21.5812	21.5810
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	21.3153	21.3105
อยู่ในไอสารละลาย 2	21.1617	21.1529
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	21.3023	21.2994
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	21.2540	21.2474
อยู่ในไอสารละลาย 3	21.0063	20.9957

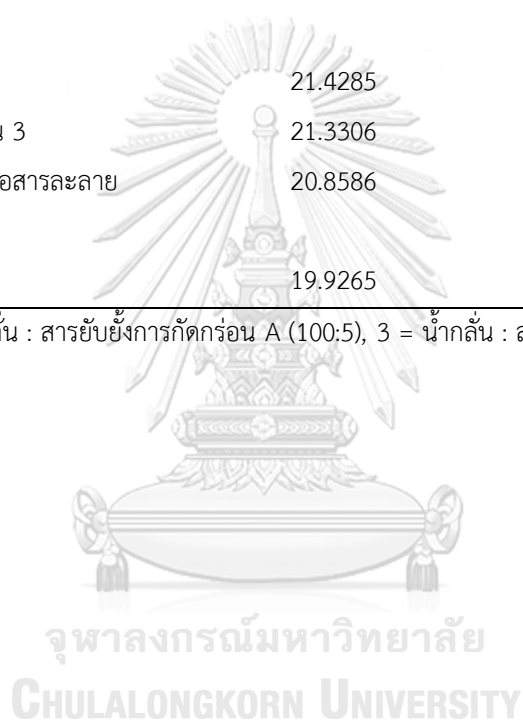
*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)



ตารางที่ ข.10 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	20.0490	19.9820
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	21.6468	21.5651
อย่างละครึ่งหนึ่ง 1		
อยู่ในไอสารละลาย 1	20.6044	20.5134
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	19.7389	19.7331
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	19.9794	19.9686
อย่างละครึ่งหนึ่ง 2		
อยู่ในไอสารละลาย 2	21.4285	21.4062
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	21.3306	21.3096
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	20.8586	20.8556
อย่างละครึ่งหนึ่ง 3		
อยู่ในไอสารละลาย 3	19.9265	19.9240

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)



ตารางที่ ข.11 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	22.2818	22.2300
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	21.2921	21.2480
อยู่ในไอสารละลาย 1	21.8707	21.8123
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	19.7544	19.7446
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	20.6525	20.6470
อยู่ในไอสารละลาย 2	20.4521	20.4490
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	21.2904	21.2853
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	20.5447	20.5352
อยู่ในไอสารละลาย 3	20.6444	20.6389

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)

ตารางที่ ข.12 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	22.0864	20.9504
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	22.4695	21.3904
อย่างละครึ่งหนึ่ง 1		
อยู่ในไอสารละลาย 1	21.1657	20.7333
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	20.9598	20.5737
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	21.7655	21.3647
อย่างละครึ่งหนึ่ง 2		
อยู่ในไอสารละลาย 2	22.3788	22.2119
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	21.3857	20.7960
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย	20.0212	19.5742
อย่างละครึ่งหนึ่ง 3		
อยู่ในไอสารละลาย 3	20.1764	19.8577

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ข.13 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	22.5452	21.7234
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	21.5921	21.1029
อยู่ในไอสารละลาย 1	20.4461	20.1388
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	21.1212	20.7493
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	21.9747	21.6953
อยู่ในไอสารละลาย 2	21.2993	21.1003
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	22.1188	21.6431
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	20.8735	20.5321
อยู่ในไอสารละลาย 3	21.3555	21.1052

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ข.14 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	20.3768	19.6004
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	20.4200	19.7439
อยู่ในไอสารละลาย 1	20.2310	19.9405
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	20.5048	20.1545
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	19.5116	19.1468
อยู่ในไอสารละลาย 2	20.2582	20.0843
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	21.2122	20.8032
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	20.0711	19.6819
อยู่ในไอสารละลาย 3	20.5751	20.3198

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ข.15 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 4)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	21.2899	20.4890
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	20.5851	19.8310
อยู่ในไอสารละลาย 1	19.6906	19.4093
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	20.4609	20.0803
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	21.2651	20.8878
อยู่ในไอสารละลาย 2	20.7987	20.6234
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	22.0692	21.6461
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	20.9343	20.5013
อยู่ในไอสารละลาย 3	21.2241	21.0096

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ข.16 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 5)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	20.4396	19.6626
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	20.7541	20.0121
อยู่ในไอสารละลาย 1	21.5816	21.4344
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	20.3564	20.0551
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	20.0779	19.7126
อยู่ในไอสารละลาย 2	20.0410	19.9747
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	22.0665	21.6913
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	20.0444	19.6711
อยู่ในไอสารละลาย 3	20.8190	20.6816

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ข.17 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	22.0864	20.9504
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	22.4695	21.3904
อยู่ในไอสารละลาย 1	21.1657	20.7333
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	22.4971	22.4839
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	21.4933	21.4314
อยู่ในไอสารละลาย 2	20.9601	20.8265
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	20.3414	20.1399
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	21.7633	21.5354
อยู่ในไอสารละลาย 3	22.9683	22.7893

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)

ตารางที่ ข.18 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	22.5452	21.7234
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	21.5921	21.1029
อยู่ในไอสารละลาย 1	20.4461	20.1388
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	20.4657	20.4449
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	20.3369	20.3242
อยู่ในไอสารละลาย 2	21.7157	21.6802
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	21.5075	21.3845
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	22.3658	22.2092
อยู่ในไอสารละลาย 3	22.7656	22.6775

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)

ตารางที่ ข.19 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	20.3768	19.6004
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	20.4200	19.7439
อยู่ในไอสารละลาย 1	20.2310	19.9405
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	20.3797	20.3649
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	20.3233	20.3049
อยู่ในไอสารละลาย 2	20.6853	20.5898
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	21.1073	20.8560
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	21.0594	20.8378
อยู่ในไอสารละลาย 3	20.6364	20.3862

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)

ตารางที่ ข.20 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 4)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	21.2899	20.4890
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	20.5851	19.8310
อยู่ในไอสารละลาย 1	19.6906	19.4093
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	22.2284	22.2087
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	21.1397	21.1235
อยู่ในไอสารละลาย 2	20.1593	20.0750
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.5654	19.3756
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	20.5490	20.3296
อยู่ในไอสารละลาย 3	22.3617	22.0938

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)

ตารางที่ ข.21 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 5)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	20.4396	19.6626
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	20.7541	20.0121
อยู่ในไอสารละลาย 1	21.5816	21.4344
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	21.1820	21.1618
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 2	21.1952	21.1893
อยู่ในไอสารละลาย 2	19.1524	19.0572
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	21.1805	21.0615
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 3	20.4333	20.2911
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.6879	18.5816

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)

ตารางที่ ข.22 น้ำหนักชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ใน 20% สารละลายกรดโพรไฟโอนิก ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดลองเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังทดลองเฉลี่ย (g)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	18.8920	18.8920
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอสารละลาย อย่างละครึ่งหนึ่ง 1	18.0273	18.0273
อยู่ในไอสารละลาย 1	17.8978	17.8978

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก



ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	18.48	52.86	2.97
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.15	52.46	2.94
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	17.46	52.73	2.94
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	17.85	52.45	2.81
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	20.12	52.49	2.83
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.26	52.71	2.84
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.91	52.88	2.82
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.31	53.35	2.81
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	19.56	52.31	2.95
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 4	19.39	52.49	2.82
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.35	52.92	2.84
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 4			
อยู่ในไอสารละลาย 4	18.28	53.56	2.82
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 5	18.01	52.87	2.75
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.33	52.89	2.82
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 5			
อยู่ในไอสารละลาย 5	18.24	52.08	2.85
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 6	19.06	53.05	2.88
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.54	52.85	2.86
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 6			
อยู่ในไอสารละลาย 6	19.30	52.58	2.73

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น + 30 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 3 = น้ำกลั่น + 45 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 4 = น้ำกลั่น + 60 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 5 = น้ำกลั่น + 75 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 6 = น้ำกลั่น + 90 wt.% โมโนเอทานอลามีน

ตารางที่ ค.2 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	18.32	52.02	2.92
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.54	52.51	2.94
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	19.84	49.71	2.87
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	18.45	52.58	2.79
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.25	52.38	2.91
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.09	52.76	2.80
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.12	52.91	2.82
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.97	49.14	2.82
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.88	52.64	2.75
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 4	18.30	53.47	2.83
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.27	52.96	2.77
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 4			
อยู่ในไอสารละลาย 4	19.27	52.45	2.84
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 5	18.22	52.65	2.77
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.32	52.73	2.75
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 5			
อยู่ในไอสารละลาย 5	19.44	52.62	2.85
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 6	19.91	52.47	2.73
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	17.73	52.31	2.80
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 6			
อยู่ในไอสารละลาย 5	19.02	53.14	2.86

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น + 30 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 3 = น้ำกลั่น + 45 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 4 = น้ำกลั่น + 60 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 5 = น้ำกลั่น + 75 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 6 = น้ำกลั่น + 90 wt.% โมโนเอทานอลามีน

ตารางที่ ค.3 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในสารละลายโมโนเอทานอลามีน ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

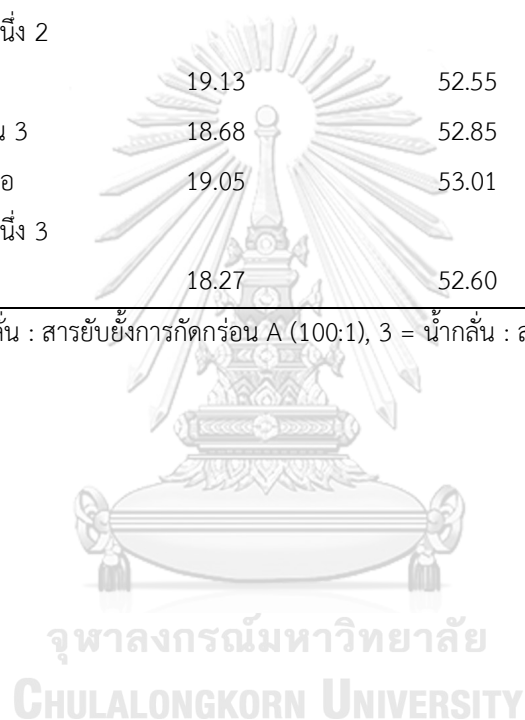
ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.85	52.67	2.96
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.33	52.42	2.81
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	19.85	52.64	2.85
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	19.90	52.91	2.92
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.27	53.40	2.80
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	19.50	52.29	2.91
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.14	51.26	2.83
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	17.69	52.10	2.77
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.12	50.36	2.73
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 4	19.27	52.81	2.75
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.11	51.98	2.77
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 4			
อยู่ในไอสารละลาย 4	18.20	52.01	2.83
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 5	18.66	52.53	2.88
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.87	49.89	2.90
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 5			
อยู่ในไอสารละลาย 5	19.70	52.72	2.89
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 6	18.72	52.50	2.83
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.77	53.10	2.86
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 6			
อยู่ในไอสารละลาย 6	18.25	52.12	2.87

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น + 30 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 3 = น้ำกลั่น + 45 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 4 = น้ำกลั่น + 60 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 5 = น้ำกลั่น + 75 wt.% โมโนเอทานอลามีน, 6 = น้ำกลั่น + 90 wt.% โมโนเอทานอลามีน

ตารางที่ ค.4 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	18.48	52.86	2.97
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.15	52.46	2.94
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	17.46	52.73	2.94
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	19.36	52.52	2.99
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.66	52.48	2.97
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	19.13	52.55	2.94
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	18.68	52.85	2.98
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.05	53.01	2.95
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.27	52.60	2.96

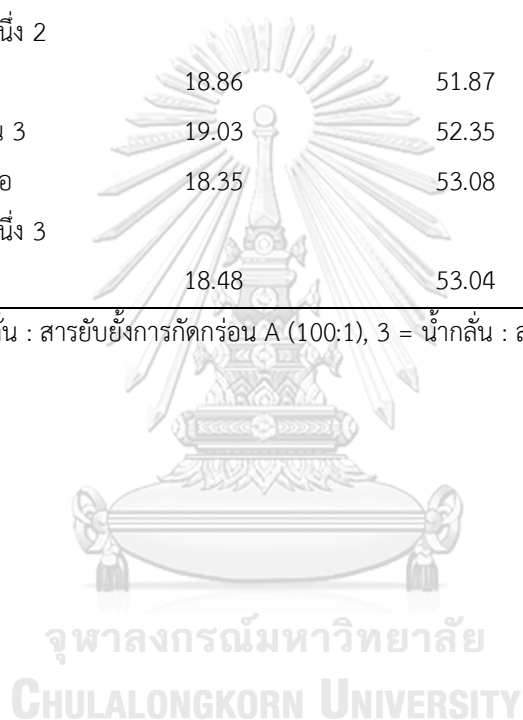
*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)



ตารางที่ ค.5 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.85	52.67	2.96
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	17.44	52.53	2.81
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	19.53	52.53	2.88
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	18.46	52.56	2.93
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.00	52.57	2.88
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.86	51.87	2.89
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.03	52.35	2.82
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.35	53.08	2.89
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.48	53.04	2.91

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)



ตารางที่ ค.6 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.11	53.09	2.82
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.33	52.42	2.81
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	19.85	52.64	2.85
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	18.52	52.56	2.70
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.17	52.46	2.82
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.33	52.90	2.80
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.12	52.25	2.77
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.20	51.91	2.86
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	17.47	51.50	2.80

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ค.7 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 4)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	17.32	52.40	2.72
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.47	52.79	2.79
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	19.34	52.44	2.85
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	19.19	52.35	2.82
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	17.81	52.82	2.83
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	17.67	52.71	2.73
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	17.97	52.14	2.78
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.77	51.60	2.76
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	19.30	52.31	2.80

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ค.8 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 5)

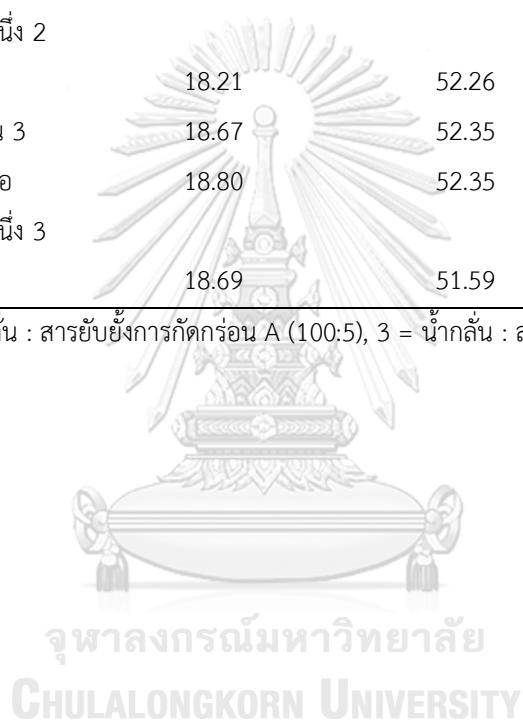
ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	18.32	52.02	2.92
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.54	52.51	2.94
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	19.84	49.71	2.87

*1 = น้ำกลั่น

ตารางที่ ค.9 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	18.48	52.86	2.97
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.15	52.46	2.94
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	17.46	52.73	2.94
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	18.97	53.03	2.75
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.01	51.94	2.83
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.21	52.26	2.95
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	18.67	52.35	2.85
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.80	52.35	2.85
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.69	51.59	2.84

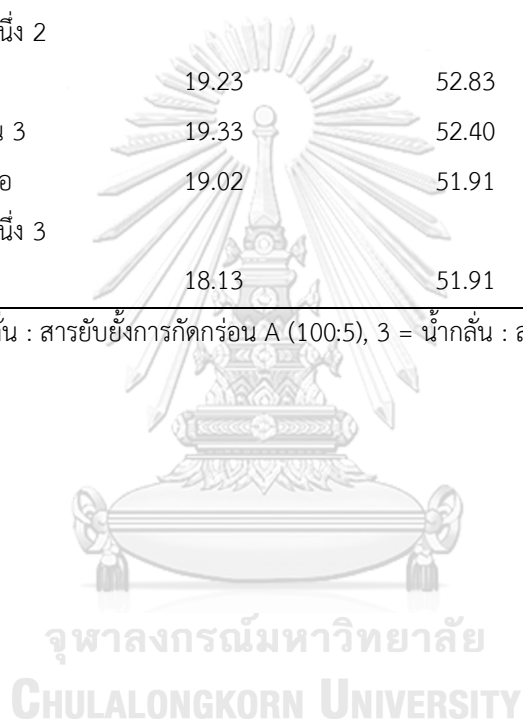
*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)



ตารางที่ ค.10 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	18.32	52.02	2.92
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.54	52.51	2.94
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	19.84	49.71	2.87
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	18.73	51.63	2.73
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.73	52.14	2.77
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	19.23	52.83	2.78
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.33	52.40	2.79
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.02	51.91	2.81
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.13	51.91	2.79

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)



ตารางที่ ค.11 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.85	52.67	2.96
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.33	52.42	2.81
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	19.85	52.64	2.85
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	18.35	52.50	2.73
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.39	52.17	2.74
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.69	52.51	2.78
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.23	52.94	2.77
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.25	53.35	2.83
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.22	52.79	2.92

*1 = น้ำกลั่น, 2 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = น้ำกลั่น : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)

ตารางที่ ค.12 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.05	52.96	2.96
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.41	53.16	2.91
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	20.11	49.25	2.94
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	18.35	52.81	2.92
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.99	49.94	2.94
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	19.34	52.66	2.92
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.22	51.54	2.91
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	17.73	52.22	2.91
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.07	50.64	2.93

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ค.13 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.51	52.60	2.91
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.01	52.06	2.74
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	18.24	52.55	2.86
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	18.54	52.50	2.78
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.43	52.25	2.80
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.70	52.57	2.91
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.33	52.59	2.84
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.40	52.16	2.84
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.78	52.61	2.90

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ค.14 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.12	52.24	2.76
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.19	52.58	2.92
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	17.73	52.67	2.95
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	17.85	52.93	2.87
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	17.74	51.53	2.80
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	17.87	52.84	2.86
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.28	52.50	2.77
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.33	52.10	2.86
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.87	52.39	2.77

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ค.15 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 4)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.44	52.47	2.78
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.96	51.97	2.88
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	18.11	52.21	2.88
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	18.47	52.56	2.88
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.48	52.18	2.89
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.62	52.45	2.84
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.16	52.96	2.84
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.87	51.82	2.89
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.39	52.41	2.81

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ค.16 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:1 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 5)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	17.81	53.21	2.82
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.30	52.81	2.84
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	18.66	52.74	2.84
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	18.01	52.69	2.93
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.76	52.53	2.80
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.50	52.51	2.89
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.77	52.33	2.91
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	17.71	52.30	2.93
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.24	52.13	2.96

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:1), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:1)

ตารางที่ ค.17 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.05	52.96	2.96
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.41	53.16	2.91
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	20.11	49.25	2.94
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	19.31	52.74	2.93
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.88	52.50	2.93
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.28	52.54	2.92
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	18.03	52.67	2.91
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.44	51.93	2.88
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	19.96	52.68	2.85

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)

ตารางที่ ค.18 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 2)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.51	52.60	2.91
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.01	52.06	2.74
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	18.24	52.55	2.86
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	17.76	52.82	2.74
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.20	51.70	2.90
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.63	52.23	2.91
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	18.85	52.38	2.84
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.45	52.48	2.98
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	19.91	51.91	2.82

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)

ตารางที่ ค.19 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 3)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.12	52.24	2.76
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.19	52.58	2.92
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	17.73	52.67	2.95
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	17.81	52.72	2.80
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.37	52.11	2.83
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.17	52.56	2.80
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	18.88	52.57	2.89
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.00	52.19	2.85
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	18.96	51.57	2.82

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)

ตารางที่ ค.20 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 4)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.44	52.47	2.78
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.96	51.97	2.88
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	18.11	52.21	2.88
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	19.27	52.75	2.79
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.93	52.45	2.80
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.25	52.44	2.81
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	17.94	52.48	2.85
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.33	51.56	2.80
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	19.98	52.68	2.83

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)

ตารางที่ ค.21 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน (ครั้งที่ 5)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	17.81	53.21	2.82
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.30	52.81	2.84
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	18.66	52.74	2.84
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 2	19.20	52.71	2.88
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.68	52.54	2.86
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 2			
อยู่ในไอสารละลาย 2	18.09	51.83	2.81
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 3	19.09	52.31	2.89
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	19.29	51.94	2.82
สารละลายอย่างละครึ่งหนึ่ง 3			
อยู่ในไอสารละลาย 3	17.67	51.35	2.84

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก, 2 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน A (100:5), 3 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก : สารยับยั้งการกัดกร่อน B (100:5)

ตารางที่ ค.22 ขนาดชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L ใน 20% สารละลายกรดโพรไฟโอนิก ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 2 วัน (ครั้งที่ 1)

ชิ้นงาน	ความกว้างเฉลี่ย (mm)	ความยาวเฉลี่ย (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)
จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น 1	19.38	48.21	2.85
จุ่มอยู่ในสารละลายและไอ	18.62	48.29	2.84
สารละลายอย่างละครั้งหนึ่ง 1			
อยู่ในไอสารละลาย 1	18.53	47.96	2.85

*1 = สารละลายกรดโพรไฟโอนิก



ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 ค่า pH ของสารละลายโมโนเอทาโนลามีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิจุดเดือดเป็นเวลา 1 วัน

ชิ้นงาน	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	
		จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น	อยู่ในไอสารละลาย
น้ำกลั่น	5	5	5
น้ำกลั่น + 30 wt.% โมโนเอทาโนลามีน	10	11	10
น้ำกลั่น + 45 wt.% โมโนเอทาโนลามีน	11	11	10
น้ำกลั่น + 60 wt.% โมโนเอทาโนลามีน	11	11	10
น้ำกลั่น + 75 wt.% โมโนเอทาโนลามีน	11	11	10
น้ำกลั่น + 90 wt.% โมโนเอทาโนลามีน	11	11	10

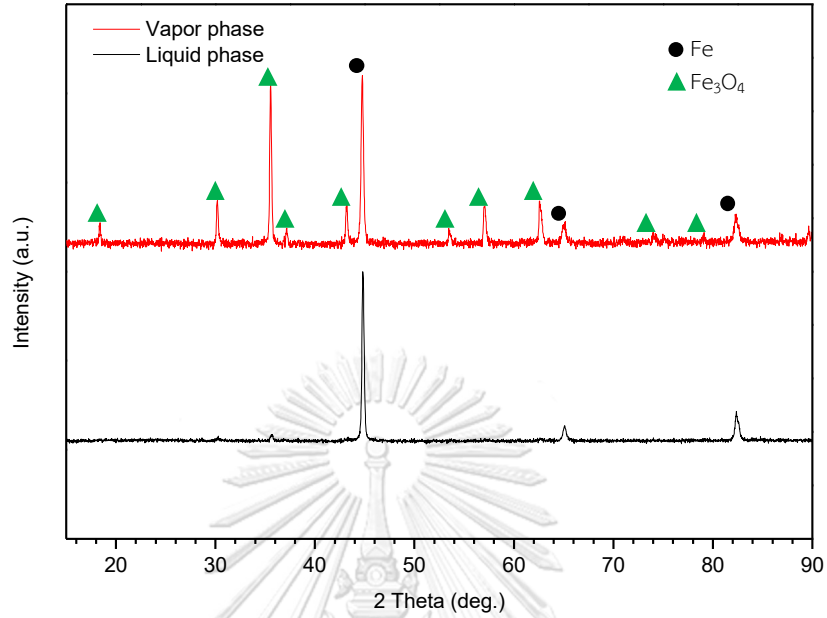
ตารางที่ ง.2 ค่า pH ในน้ำกลั่นที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ที่อุณหภูมิจุดเดือดเป็นเวลา 1 วัน

ชิ้นงาน	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	
		จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น	อยู่ในไอสารละลาย
น้ำกลั่น	5	5	5
น้ำกลั่น + สารยับยั้งการ กัดกร่อน A (100:1)	9	10	9
น้ำกลั่น + สารยับยั้งการ กัดกร่อน B (100:1)	10	10	9
น้ำกลั่น + สารยับยั้งการ กัดกร่อน A (100:5)	11	11	10
น้ำกลั่น + สารยับยั้งการ กัดกร่อน B (100:5)	11	11	10

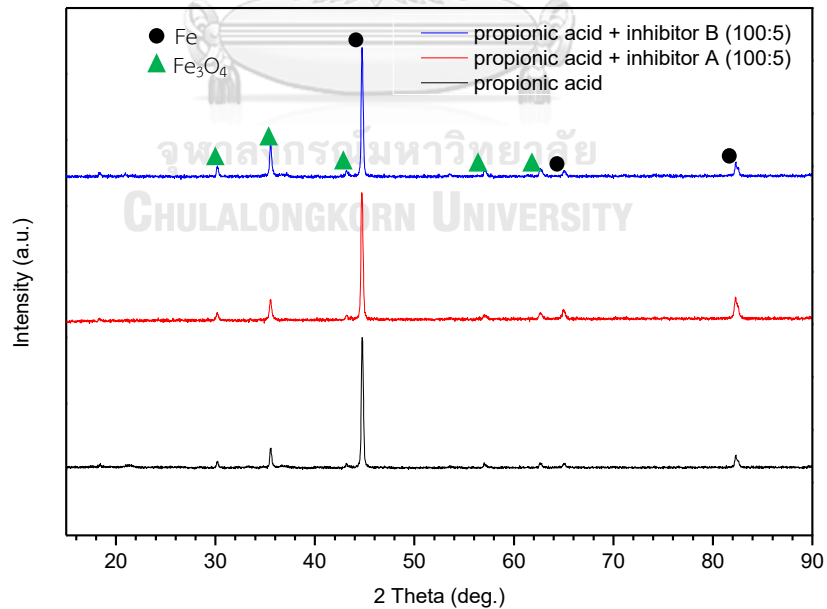
ตารางที่ ง.3 ค่า pH ใน 5% สารละลายกรดโพรไฟโอนิกที่มีสารยับยั้งการกักร่อน A และ B ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

ชิ้นงาน	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	
		จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งชิ้น	อยู่ในไอสารละลาย
สารละลายกรดโพรไฟโอนิก	3	4	3
สารละลายกรดโพรไฟโอนิก+ สารยับยั้งการกักร่อน A (100:1)	5	5	3
สารละลายกรดโพรไฟโอนิก+ สารยับยั้งการกักร่อน B (100:1)	4	4	3
สารละลายกรดโพรไฟโอนิก+ สารยับยั้งการกักร่อน A (100:5)	4	10	9
สารละลายกรดโพรไฟโอนิก+ สารยับยั้งการกักร่อน B (100:5)	4	6	3

ภาคผนวก จ



รูปที่ จ.1 XRD patterns ของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ในน้ำกลั่น ในสภาวะจุ่มอยู่ในสารละลายทั้งขึ้นและไอสารละลาย ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน



รูปที่ จ.2 XRD patterns ของเหล็กกล้าคาร์บอน A283 ใน 5% สารละลายกรดโพรไพโอนิกที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน A และ B ในอัตราส่วน 100:5 ในสภาวะไอสารละลาย ที่อุณหภูมิจุดเดือด เป็นเวลา 1 วัน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวปฐมพร ลักขณาศรี
วัน เดือน ปี เกิด	4 เมษายน 2537
สถานที่เกิด	ยะลา
วุฒิการศึกษา	- ประถมศึกษา โรงเรียนธีรวิทยา - มัธยมศึกษา โรงเรียนเบตง"วีระราษฎร์ประสาน" - วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุขั้นสูงและนาโนเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	30/1 ซ.ธีรวิทยา ต.เบตง อ.เบตง จ.ยะลา 95110

